

Intensification de la culture du sorgho et du mil en zones sahélienne et soudano-sahélienne du Mali

Intensification of Sorghum and Millet Production in the Sahelian and Sudano-Sahelian Zones of Mali

Coulibaly Adama¹, Aune Jens Bernt², Kamkam Woumou¹, Famanta Mahamoudou³

¹Laboratoire Sol, Eau, Plantes, Institut d'Économie Rurale - BP 258 Bamako, Mali

²Département des Études Internationales pour le Développement et l'Environnement, Noragric, Université des Sciences de la Vie, Ås, Norvège

³Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée de Katibougou IPR/IFRA - BP 06, Koulikoro, Mali

*Auteur pour la correspondance : adamacz097@gmail.com

Résumé

Deux séries d'expérimentations ont été conduites sur l'intensification de la culture du mil et du sorgho en zones sahélienne et soudanienne du Mali. Les traitements ont été constitués en ajoutant graduellement un nouveau facteur à chaque niveau d'intensification (en coûts croissants). Dans la première série d'expérimentations, les traitements étaient composés du trempage des semences dans l'eau, du microdosage de l'engrais à 0,5 g et à 2 g par poquet de NPK tandis que la seconde série était un essai pérenne de quatre ans en station incluant le trempage des semences, le traitement phytosanitaire des semences à l'insecticide/fongicide, l'application de microdoses d'engrais NPK et d'urée au tallage.

Dans les deux séries, il est ressorti que le sorgho a répondu plus aux niveaux croissants d'intensification que le mil. L'augmentation de rendement due au trempage a été de l'ordre de 55 % pour le sorgho en 2006 contre 19 % en 2007 et en 2008 tandis que la réponse du mil a été de moins de 13 % en 2007 et 2008. Le traitement combinant le trempage des semences et l'application de 0,5 g d'engrais NPK par poquet a obtenu en moyenne 131 % d'augmentation de rendement en 2006. Les augmentations correspondantes de rendement en 2007 et en 2008 ont été de 26 et 41 % respectivement par rapport aux témoins dans les deux séries. Pour le mil, l'augmentation de rendement a été de 17 et 35 %.

Il n'y avait pas de différence significative de rendement grains entre 0,5 et 2 g d'engrais NPK par poquet pour le mil alors que dans l'une des deux séries, il y avait un accroissement de rendement avec l'application de 2 g par poquet par rapport à

0,5 g. Il n'y avait que de petites différences dans la marge brute entre les traitements avec 0,5 et 2 g d'engrais par poquet, mais le traitement avec 0,5 g d'engrais a donné une différence significative pour l'efficacité d'utilisation de l'engrais et pour le ratio valeur-coût plus élevé que ceux du traitement avec 2 g d'engrais. Le trempage des semences et le microdosage avec de faibles doses d'engrais semblent être une option intéressante dans les zones marginales difficiles car le pourcentage d'augmentation du rendement dû au traitement est plus élevé lorsque le niveau de rendement du témoin est faible. En ordonnant les traitements en fonction de la marge brute croissante, il a été démontré que le trempage des semences et le microdosage n'augmentent pas le risque de réduction de la marge brute des agriculteurs, mais ces méthodes augmentent la probabilité d'obtention d'une marge brute élevée.

La deuxième série d'expérimentations a montré que le traitement des semences avec un insecticide/fongicide a augmenté le rendement de 12% (79 kg/ha) et de 9,5% (89 kg/ha) respectivement pour le mil et le sorgho. À Sotuba, le niveau d'intensification le plus élevé a donné une augmentation de rendement de 76% (843 kg/ha) par rapport au témoin. L'application de l'urée au tallage était la principale cause de cette augmentation de rendement. À Kopro, il n'y a eu aucun effet de l'intensification au-delà de l'application de la microdose au semis et ce niveau d'intensification a augmenté le rendement de 70% (387 kg/ha) par rapport au témoin. Le Rapport Valeur sur Coût (RVC) pour le traitement avec une marge brute élevée a été de 15,5 pour le sorgho et 63,1 pour le mil, ce qui a dépassé largement le seuil de 2 pour les deux cultures.

Ces deux séries d'expérimentations ont montré que l'intensification agricole du sorgho et du mil peut être réalisée à faible coût et que le retour sur investissement à ce type d'intensification est très bon.

Mots-clés : intensification, trempage, microdosage, insecticide/fongicide.

Abstract

Two series of experiments were conducted on the intensification of millet and sorghum production in the Sahelian and Sudanian zones of Mali. Treatments were made by gradually adding a new factor at each level of intensification (in increasing costs). In the first set of experiments, the treatments included seed priming, the application of microdoses of NPK fertilizer at a rate of 0.5 g and 2 g per hole, while the second set consisted of a four-year perennial in-station trial, involving seed priming, seed treatment with insecticide/fungicide, as well as the application of microdoses of NPK fertilizer and urea at tillering.

Both series of experiments showed that sorghum was more responsive to the increasing levels of intensification than millet. Yield levels increased by about 55% for sorghum in 2006 due to seed priming, compared with 19% in 2007 and 2008, while the response of millet was lower than 13% in 2007 and 2008. The combination of seed priming and the application of 0.5 g of NPK fertilizer per hole resulted in an increase in yield by 131% in 2006. The corresponding yield increases in 2007 and 2008 were 26% and 41%, respectively, compared with the control in both sites. For millet, yields increased by 17% and 35%.

There was no significant difference in grain yield between the application of 0.5 and 2 g of NPK fertilizer per hole for millet, while in one of the two series, there was an increase in yield with the application of 2 g, compared with 0.5 g per hole. There were only small differences in the gross margin between treatments with 0.5 g and 2 g of fertilizer per hole, but the treatment with 0.5 g of fertilizer showed a significant difference as to fertilizer use efficiency and resulted in a value-cost ratio (VCR) higher than those of the treatment with 2 g of fertilizer. Seed priming and micro-dosing with low rates of fertilizer appear to be an attractive option in challenging marginal environments as the percentage increase in yield due to treatment is higher where the yield level of the control is low. By aligning treatments with the increase in gross margins, it has been shown that seed priming and micro-dosing do not increase the risk of reducing farmers' gross margins, but these methods increase the likelihood of obtaining high gross margins.

The second set of experiments showed that seed treatment with insecticide/fungicide increased yields by 12% (79 kg/ha) and 9.5% (89 kg/ha) respectively for millet and sorghum. In Sotuba, the highest intensification level increased yields by 76% (843 kg/ha), compared with the control. The application of urea at tillering was the main cause of this increase in yield. In Koporo, intensification had no impact, except micro-dosing at planting, and this kind of intensification increased yields by 70% (387 kg/ha), compared with the control. The VCR for treatment with a high gross margin was 15.5 and 63.1 for sorghum and millet respectively, which was well above the threshold of 2 for both crops.

These two sets of experiments show that agricultural intensification for sorghum and millet can be achieved at low cost and that the return on investment for this type of intensification is very good.

Key words: *intensification, priming, micro-dosing, insecticide/fungicide.*

Introduction

Le développement de l'agriculture est un défi dans les zones sahélienne et sahélo-soudanienne du Mali du fait que les précipitations sont souvent inégalement réparties dans le temps et dans l'espace et des fréquentes sécheresses qui se produisent tout au long de la saison. Ce qui affecte la levée, le tallage, la floraison des cultures et le remplissage des grains. Le développement des cultures est aussi limité par l'apport limité de nutriments végétaux du sol, en particulier l'azote et le phosphore (Penning de Vries, 1982). Ces facteurs augmentent les risques liés à l'agriculture au Sahel.

Dans ces zones, plusieurs technologies ont été proposées pour améliorer la production agricole. Ces technologies comprennent le trempage des semences (Aune et Ousman, 2011), le microdosage – application de petites quantités d'engrais minéraux à proximité des plantes – (Buerkert *et al.*, 2001 ; Aune et Ousman, 2011), le billonnage (Subbarao *et al.*, 2000), les diguettes et les zaïs pour la rétention de l'eau (Sawadogo, 2011). Ces techniques peuvent assurer une levée uniforme, une croissance vigoureuse et un meilleur remplissage des grains des cultures.

L'intensification de la production agricole au Sahel a déjà été décrite comme l'ascension des marches d'un escalier (Aune et Bationo, 2008). Ces deux séries d'expérimentations s'appuient sur cette approche ainsi imagée pour la tester dans les conditions de production au Mali. La première série d'expérimentations comprend le trempage des semences et l'augmentation des niveaux de microdoses d'engrais en milieu paysan tandis que dans la deuxième série (en station), il a été inclus, en plus du trempage des semences et du microdosage, un traitement insecticide/fongicide et un apport d'urée au tallage.

L'étude évalue l'effet de ces technologies sur la levée et le rendement des cultures, le revenu brut et le RVC. Son objectif était de déterminer dans quelles conditions, l'intensification serait bénéfique et de montrer les niveaux d'intensification appropriés pour la zone soudanienne (régions de Koulikoro et Ségou) et pour la zone sahélienne (région de Mopti) du Mali. Les options proposées ici ne visent pas à maximiser les rendements, mais plutôt à intensifier la production céréalière dans les limites des moyens disponibles pour les paysans pauvres du Sahel (Photo 1).



Photo 1 : Plants de sorgho issus de semences trempées plus microdoses et traitement phytosanitaire des semences

Matériel et méthodes

Matériel

Présentation des sites

Les expérimentations ont été conduites à Nossombougou et à Didiéni dans la région de Koulikoro et à Konobougou dans la région de Ségou (Tableau 1). Au total neuf (9) villages ont été impliqués dans l'étude. Dans chaque village, le projet a identifié 15 paysans volontaires qui ont accepté de conduire les tests. Les sols dans ces zones étaient limono-sableux lessivés et sablo-limoneux (PIRT, 1983).

Tableau 1 : Caractéristiques agro-climatiques des sites d'essai

Sites	Pluviosité (mm)	Zones agro-climatiques	Cultures	Villages
Didiéni	500	Sahel	Mil, arachide	2
Nossombougou	600	Sahel	Mil, sorgho, arachide	4
Konobougou	700	Soudan Sahel	Mil, sorgho, arachide	3

Matériel végétal

Pour le choix des cultures, la variété locale Toroniou pour le mil et la variété Djacoumbé pour le sorgho qui arrivent à maturité en 90 et 100 jours respectivement ont été utilisées.

Méthodes

Expérimentation 1 : Effets du trempage des semences plus microdosage sur les rendements du sorgho et du mil

L'expérimentation a été réalisée pour tester les effets du trempage des semences dans l'eau et du microdosage de l'engrais NPK sur les rendements du sorgho et du mil. Les traitements étaient les suivants :

- T1 : Témoin absolu ;
- T2 : Trempage des semences ;
- T3 : Trempage des semences + microdosage de l'engrais à 0,5 g par poquet (soit 12,5 kg/ha NPK 15-15-15). L'engrais a été placé à côté du poquet au semis ;
- T4 : Trempage des semences + microdosage de l'engrais à 2 g par poquet (50 kg/ha NPK 15-15-15). L'engrais a été placé à côté du poquet 15 jours après semis (JAS).

Les semences de mil et de sorgho ont été trempées dans de l'eau pendant 8 heures et ensuite séchées à l'air libre pendant 2 heures avant le semis. Les graines ont ensuite été traitées avec un insecticide/fongicide (Permethrine et Thirame) afin de réduire les attaques des champignons et des insectes.

Les traitements testés en 2006 ont été les T1, T2 et T4 alors qu'en 2007 et 2008 tous les quatre ont été testés. Le champ paysan était considéré comme une répétition. La taille de chaque parcelle était de 1 000 m². Le rendement a été mesuré sur trois carrés de 10 m² chacun choisis au hasard.

Les parcelles ont été semées après une pluie d'environ 15 mm pour les sols sablonneux et 20 mm pour les sols limoneux. Le désherbage des parcelles a été fait à la demande et le démariage à deux plantes par poquet. L'espacement des lignes était de 80 cm et de 50 cm entre les poquets, faisant 25 000 poquets/ha.

Effets de la durée de séchage des semences trempées sur la levée et le rendement du sorgho et du mil

Les paysans ne sont pas toujours capables de semer toutes les graines immédiatement après le trempage des semences. Afin de tester l'effet du temps de séchage, les semences ont été séchées pendant 2 heures, 24 heures, 48 heures et 72 heures. Le dispositif expérimental était un bloc de Fisher avec quatre traitements en 2010 et trois traitements en 2011. La taille de chaque parcelle était de 25 m². Les écartements de semis étaient les mêmes que dans les précédents tests.

Expérimentation 2: Effets du trempage des semences plus microdosage avec traitement insecticide/fongicide et apport d'urée au tallage sur les rendements du sorgho et du mil

L'essai a été conduit pendant quatre ans à la station de recherche de Sotuba dans la région de Koulikoro et à la sous-station de recherche de Koporo-Pen dans la région de Mopti. Cet essai a également été ajouté pour évaluer l'effet du traitement des semences avec un insecticide/fongicide et avec apport d'urée au tallage.

Les traitements ont été organisés en fonction du coût croissant de l'intensification comme dans la première série d'expérimentations. Les traitements ont été les suivants:

1. Témoin ;
2. Trempage des semences (TS) ;
3. TS + Traitement des semences (tS) ;

4. TS + tS+ microdosage 5 kg NPK/ha au semis (Ms);
5. TS + tS + microdosage 5 kg NPK/ha au semis (Ms) + microdosage 5 kg NPK/ha au tallage (Mt);
6. TS + tS + microdosage 5 kg NPK/ha au semis (Ms) + 25 kg d'urée/ha au tallage.

La taille de la parcelle élémentaire était de 25,6 m² et les travaux ont été menés sur les mêmes parcelles pendant quatre ans. Les précipitations annuelles moyennes dans les deux sites étaient de 850 mm à Sotuba et de 450 mm à Koporo-Pen.

Mesures et analyse de données des deux séries d'expérimentations

Les observations ont porté sur le nombre de plants levés, le nombre d'épis récoltés et les rendements paille et grains. Une analyse de variance a été faite suivant la procédure statistique de SAS et le test de Duncan à $\alpha = 0,05$ a permis de séparer les moyennes des différents traitements.

Efficienc e d'Utilisation de l'Engrais

L'efficienc e d'utilisation de l'engrais (EUE) a été calculée en faisant le rapport entre le rendement grains dû à l'engrais et la quantité d'engrais appliquée. Selon Kelly *et al.* (2006), la valeur seuil est de 10 kg de grain (mil ou sorgho) pour chaque kg d'engrais. L'EUE a été calculée pour l'effet combiné du trempage des semences et du microdosage et pour le microdosage seul. La différence de rendement entre le trempage des semences plus le microdosage moins le témoin a été utilisée pour calculer l'effet combiné du trempage et du microdosage tandis que la différence entre le «trempage plus le microdosage» moins «le trempage» a été utilisée pour calculer l'effet du microdosage seul.

Analyse des conditions environnementales par rapport à la réponse de la culture au trempage des semences et au microdosage

L'analyse a évalué les conditions environnementales dans lesquelles le trempage des semences et le microdosage donnent les meilleurs résultats. Les rendements relatifs entre les traitements et le témoin ont été calculés et illustrés sous forme de graphiques.

Analyse économique

Le budget partiel a été calculé pour chaque traitement en tenant compte des recettes et des coûts variables. Les coûts comprenaient les intrants et les coûts de main-d'œuvre liés au trempage des semences et au microdosage. Les autres coûts de main-d'œuvre n'ont pas été inclus. Les prix locaux des céréales et des intrants ont été utilisés.

Probabilité cumulée pour la marge brute

Une analyse de probabilité a été réalisée en utilisant les résultats de tous les sites en 2007 et en 2008. Les rendements ont été ordonnés dans un ordre croissant pour chaque traitement. À partir de ces données, la probabilité cumulative d'atteindre un niveau de rendement a été estimée.

Résultats et discussion

Effets du trempage des semences plus microdosage sur les rendements du sorgho et du mil (Expérimentation 1)

Il y avait en général une bonne réponse du mil et du sorgho au trempage des semences et au microdosage, mais le sorgho était généralement plus sensible au trempage et au microdosage que le mil.

Le trempage a permis d'augmenter le rendement en grains du sorgho et du mil (Tableaux 2 et 3). Avec le trempage, le rendement du sorgho a augmenté de 55 % en 2006 alors qu'en 2007 et en 2008 l'augmentation était de 19 %. Pour le mil, la réponse au trempage a été de 49 % d'augmentation en 2006 tandis qu'en 2007 et 2008 l'augmentation était de 12 %. Ces résultats montrent que l'effet du trempage est très variable d'une année à l'autre. Le trempage des semences stimule la croissance des plantes et peut assurer une meilleure levée et une meilleure installation des cultures (Harris *et al.*, 2006; Aune et Ousman, 2011). La culture peut ainsi mieux utiliser l'humidité disponible et profiter de l'azote libre du sol en début de saison (Birch, 1958). Le trempage peut être considéré comme une «technologie durable» pour l'intensification agricole car la technique n'entraîne aucun coût ni une main-d'œuvre supplémentaire.

Les rendements ont encore augmenté lorsque le trempage des semences a été associé au microdosage de l'engrais. En ce qui concerne le trempage, les effets des microdoses d'engrais ont été plus marqués chez le sorgho que chez le mil, en termes de pourcentage d'augmentation du rendement en kg/ha. En 2006, le trempage des semences combiné avec 2 g d'engrais par poquet a augmenté le rendement de 92 % pour le mil et de 131 % pour le sorgho (Tableau 2). En 2007 et 2008, il y avait deux traitements de microdosage: un avec application de 0,5 g au semis (T3) et l'autre avec application de traitement 2 g d'engrais par poquet environ 15 jours après le semis (T4). Pour le mil, il n'y pas eu de différence significative de rendement entre les deux doses d'engrais. Les rendements ont augmenté par rapport au témoin dans l'intervalle de 16 à 34 %. Pour le sorgho à Nossombougou, les rendements ont été significativement plus élevés dans le traitement de 2 g que dans le traitement de 0,5 g. Le traitement 2 g d'engrais

a augmenté le rendement de 73 % sur ce site tandis que 0,5 g d'engrais a augmenté le rendement de 41%. À Konobougou, il n'y avait pas de différence significative entre les traitements de microdosage, mais l'augmentation du rendement comparativement au témoin des deux traitements de microdosage était de l'ordre de 30%. Cela pourrait être dû aux effets résiduels des engrais sur les champs de coton, le site de Konobougou étant situé dans la zone cotonnière du Mali. Cette réponse au trempage des semences et au microdosage est conforme aux expérimentations précédentes avec ces techniques (Aune *et al.*, 2007; Aune *et al.*, 2012; Aune et Ousman, 2011). Les rendements sont toutefois plus élevés dans cette étude et le pourcentage d'augmentation du rendement est donc inférieur à celui des études précédentes.

Tableau 2 : Effets du trempage des semences et de la microdose d'engrais sur les rendements du mil et du sorgho, kg/ha, Konobougou et Nossombougou, 2006

Traitements	Rendement en grains	
	Mil	Sorgho
1- Témoin	1 107 c	1 087 c
2- Trempage des semences	1 644 b	1 686 b
3- Trempage des semences + 2 g/poquet CC (50 kg/ha) 15 JAS	2 128 a	2 506 a
Traitement	**	**
Traitement x site	NS	**
CV (%)	41	32

CC: Complexe céréale 15-15-15 NPK; JAS: jours après semis; CV: Coefficient de variation
 Dispositif expérimental en blocs dispersés de 10 répétitions
 Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% par le test de Duncan
 ** Significatif au seuil de 1%; NS = Non significatif.

Tableau 3 : Effets du trempage des semences et de la microdose d'engrais sur les rendements du mil et du sorgho (kg/ha), Koulikoro et Ségou, 2007 – 2008

Traitement	Mil		Sorgho	
	Didiéni	Konobougou	Nossombougou	Konobougou
T1 Témoin	1 135 b	1 537 b	1 646 d	1 549 c
T2 Trempage des semences	1 240 b	1 736 b	1 965 c	1 732 bc
T3 Trempage des semences + 0,5g/poquet de CC NPK au semis dans différent poquet à côté de la semence	1 325 a	2 074 a	2 331 b	1 978 ab
T4 Trempage des semences + 2g/poquet de CC NPK (50 kg/ha) 15 JAS	1 567 a	2 034 a	2 816 a	2 011 a
Traitement	*	**	**	**
Traitement x Année	NS	NS	**	NS
CV (%)	34	30	25	20

CC : Complexe céréale 15-15-15 NPK ; JAS : Jours après semis ; CV : Coefficient de variation

Dispositif expérimental en blocs dispersés de 10 répétitions

Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% par le test de Duncan ;

*Significatif au seuil de 5% ; ** Significatif au seuil de 1% ; NS = Non significatif.

Efficienc e d'Utilisation de l'Engrais (EUE)

L'EUE a varié de 9,2 à 44,6 kg de grains par kg d'engrais appliqué (Tableau 4). L'EUE était plus élevée dans le traitement de 0,5 g d'engrais que dans le traitement de 2 g/poquet. Le sorgho a eu une EUE plus élevée que le mil. Un ratio supérieur à 10 est considéré comme une efficacité élevée (Kelly *et al.*, 2006). Sur le tableau 4, on remarque que l'application de 0,5 g d'engrais associé au trempage a entraîné une EUE de 29,1 et de 44,6 respectivement pour le sorgho et le mil. Cependant, l'application de 2 g d'engrais par poquet combinée au trempage a également donné un résultat satisfaisant, en particulier pour le sorgho. L'EUE est généralement réduite lorsque la dose d'engrais augmente (Bayaert et Roy, 2005).

Des EUE similaires ont été signalées dans les zones arides du Soudan. Le trempage combiné à l'application de 0,3 g engrais par poquet a donné une EUE de 16 et 35 respectivement pour le mil et le sorgho (Aune et Ousman, 2011). Les résultats du Niger ont montré que l'EUE a considérablement augmenté lorsque l'application d'engrais était combinée à l'application des résidus de récolte (Yamoah *et al.*, 2002).

Tableau 4 : Effets du trempage des semences et de la microdose d'engrais sur l'efficacité d'utilisation de l'engrais sur le mil et le sorgho, Koulikoro et Ségou

	Mil		Sorgho	
	2006	2007/2008	2006	2007/2008
0,5 g microdose + trempage		29,1		44,6
2 g microdose + trempage	20,4	9,2	28,3	16,3

Analyse économique

L'analyse économique a été faite sur les résultats des saisons 2007 et 2008. Suivant le tableau 5, le revenu brut du sorgho a augmenté avec l'utilisation croissante d'intrants agricoles. Le trempage des semences seul a augmenté le revenu net de 18 325 et 10 900 F CFA/ha respectivement pour le sorgho et le mil.

Pour le sorgho, le bénéfice net a augmenté par rapport au témoin de 15,4 %, 32,1 % et 41,5 % pour le Trempage des semences, le Trempage des semences + 12,5 kg de NPK/ha, et le Trempage des semences + 50 kg NPK/ha respectivement. Par contre, pour le mil, l'augmentation correspondante a été de 11,0 %, 23,9 % et 23,3 % pour le Trempage des semences, le Trempage des semences + 12,5 kg de NPK/ha, et le Trempage des semences + 50 kg NPK/ha respectivement. Ceci démontre que pour le mil, il n'y avait pas d'effet bénéfique au-delà de 0,5 g/poquet, soit 50 kg d'engrais NPK par hectare.

Le calcul du RVC pour le sorgho a montré qu'il était de 36,7 ; 9,1 et 3,4 pour le Trempage des semences, le Trempage des semences + 12,5 kg de NPK/ha, et le Trempage des semences + 50 kg NPK/ha respectivement. Pour le mil, par contre, les valeurs correspondantes étaient 21,8 ; 5,6 et 1,5. Le seuil de rentabilité du RVC pour l'introduction de nouvelles technologies étant 2, (Bationo *et al.*, 2012), tous les traitements peuvent être considérés comme donnant une réponse satisfaisante sauf le T4 pour le mil. Le trempage de la semence est clairement le traitement ayant le RVC le plus élevé. Cependant le Trempage des semences plus 0,5 g d'engrais/poquet (T3) sera l'option la plus intéressante dans la production de mil car il a un revenu net élevé et un RVC satisfaisant à la fois pour le mil et le sorgho. Pour le mil, le traitement le plus intéressant pour les agriculteurs semble être le Trempage de semences + 12,5 kg de NPK/ha. Le Trempage des semences + 50 kg NPK/ha donne une marge brute supérieure de 6 % à celle du T3, mais le RVC est de 9,1 pour T3, comparé à 3,4 pour T4.

Au Niger, il a été également signalé un faible RVC relatif à l'application de 2 g de DAP par poquet sur le mil (Biédiers et Gerard, 2015). Ces auteurs ont rapporté que le risque d'utiliser le microdosage est moindre lorsque le rendement de la parcelle témoin est

faible. Il y a donc de bonnes raisons de remettre en question la recommandation de l'ICRISAT d'utiliser le microdosage de l'ordre de 2 à 6 grammes d'engrais par poquet sur le mil (ICRISAT, 2012). L'application de 6 g d'engrais par poquet entraîne une application de 180 kg d'engrais/ha s'il y a 30 000 poquets/ha. Cela ne peut pas être considéré comme une faible dose d'engrais dans des conditions d'agriculture au Sahel. Les principaux acteurs du développement, tels que AGRA, ont également encouragé les doses proposées par l'ICRISAT (FARA, 2009).

Tableau 5 : Budget partiel du trempage des semences et de la microdose d'engrais sur le sorgho et le mil (F CFA par hectare), 2007 – 2008

	Sorgho				Mil			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Rendement moyen (kg/ha)	1 598	1 849	2 155	2 414	1 336	1 488	1 700	1 801
Mil/sorgho (F CFA/kg)	75	75	75	75	75	75	75	75
Revenu brut (F CFA/ha)	119 850	138 675	161 625	181 050	100 200	111 600	127 500	135 075
Coût semence (F CFA/ha)	600	600	600	600	600	600	600	600
Coût engrais (F CFA/ha)	0	0	3 125	12 500	0	0	3 125	12 500
Main-d'œuvre (F CFA/ha)	0	500	1 000	1 500	0	500	1 000	1 500
Coûts variables	600	1 100	4 725	14 600	600	1 100	4 725	14 600
Revenu (F CFA/ha)	119 250	137 575	156 900	166 450	99 600	110 500	122 775	120 475
RVC		36,7	9,1	3,4		21,8	5,6	1,5

T1 = témoin; T2 = Trempage de semences; T3 = Trempage de semences + 12,5 kg NPK/ha NPK; T4 = Trempage des semences + 50 kg NPK/ha

Effets de la durée de séchage des semences trempées sur la levée et le rendement du sorgho et du mil

Il peut être difficile pour les paysans de savoir la quantité de semences à tremper après une pluie suffisante car cela dépendra de la superficie qu'ils pourront semer le jour suivant. Si une grande quantité de semences a été trempée, la question sera de savoir quoi faire avec le surplus de semence. Une étude a donc été initiée pour évaluer pendant combien de temps il est possible de conserver les semences trempées sans perdre l'effet du trempage sur la germination, l'émergence et la croissance des plants. Les semences de sorgho ont été séchées à l'ombre pendant 2, 24, 48 et 72 heures après le trempage, tandis que les graines de mil ont été séchées pendant 2, 24 et 48 heures. Ni sur le sorgho ni sur le mil il n'y a eu d'effet du temps de séchage sur l'émergence, le nombre de panicules et le rendement en grains de la culture. Ces résultats montrent qu'il est

possible pour les agriculteurs de garder la semence jusqu'à trois (3) jours si le paysan n'est pas en mesure d'utiliser toutes les semences le jour où le trempage a été entrepris. Cela donne une plus grande flexibilité d'utilisation que si toutes les graines devaient être semées immédiatement après le trempage.

Effets des conditions environnementales par rapport à la réponse au trempage des semences et au microdosage

Le rendement relatif entre les traitements (T2, T3 et T4) et le témoin (T1) a été calculé; car si le rendement relatif est supérieur à 1, il y a un effet positif du traitement (trempage et microdosage) par rapport au témoin. Ce rendement relatif pour chaque traitement et chaque site a été tracé en fonction du rendement du témoin sur le site. Le rendement du témoin peut être considéré comme un indicateur de l'environnement sur le site car ce rendement est principalement déterminé par les précipitations, les conditions du sol, les maladies, les ravageurs et la pression des adventices. L'analyse de régression a montré que le bénéfice relatif du trempage et du microdosage était réduit lorsque les conditions environnementales devenaient plus favorables (rendements plus élevés chez le témoin).

Pour le sorgho, il n'y avait pratiquement aucun effet du trempage et du microdosage lorsque le rendement du témoin était supérieur à 2000 kg/ha. En dessous d'un rendement de sorgho de 900 kg/ha pour le témoin, il y avait une bonne réponse au trempage des semences et au microdosage. Entre 900 et 2000 kg/ha, il y avait un effet positif du trempage des semences et du microdosage, mais l'effet était ici plus variable. Ces résultats montrent que le trempage des semences et le microdosage sont des technologies qui conviennent surtout aux zones marginales (Figures 1, 2 et 3).

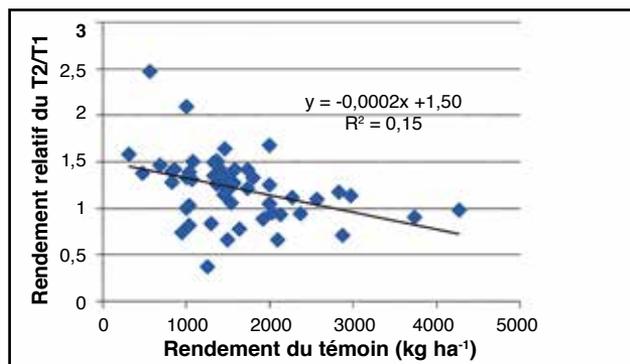


Figure 1 : Rendement relatif du sorgho T2/T1 pour les sites, 2007 et 2008

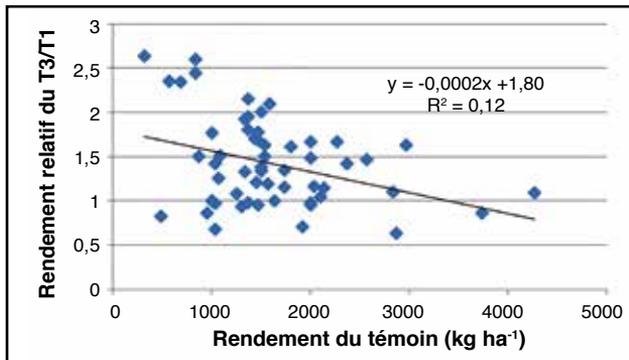


Figure 2 : Rendement relatif du sorgho T3/T1 pour les sites, 2007 et 2008

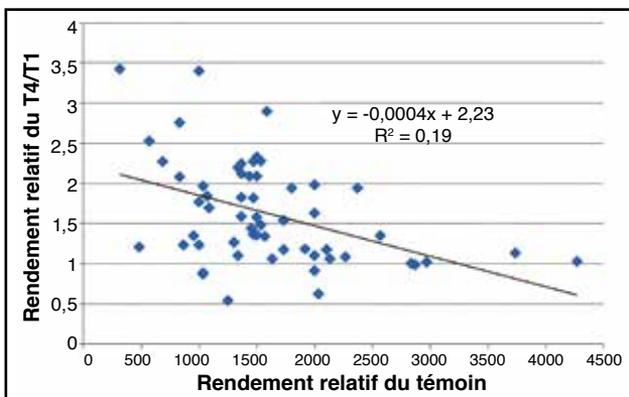


Figure 3 : Rendement relatif du sorgho T4/T1 pour les sites, 2007 et 2008

Les résultats sur le mil ont montré, comme pour le sorgho, une baisse du rendement relatif entre le traitement et le témoin lorsque le rendement du témoin augmente. Comme le montrent les figures 4, 5 et 6, il y a eu une réponse cohérente à ces traitements lorsque le rendement du témoin est inférieur à 500 kg/ha. Au-dessus de 500 kg/ha pour le témoin, la réponse par rapport au témoin est également perceptible, mais l'effet est plus variable.

Cependant, lors du tracé du rendement du témoin par rapport à l'augmentation absolue du rendement, aucune relation claire n'apparaît. La même augmentation de rendement (kg/ha) à la suite du traitement peut donc être attendue à travers différents niveaux de rendement du témoin.

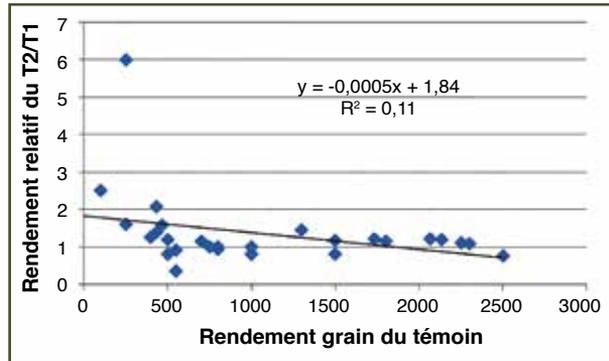


Figure 4 : Rendement relatif du mil T2/T1 pour les sites, 2007 et 2008

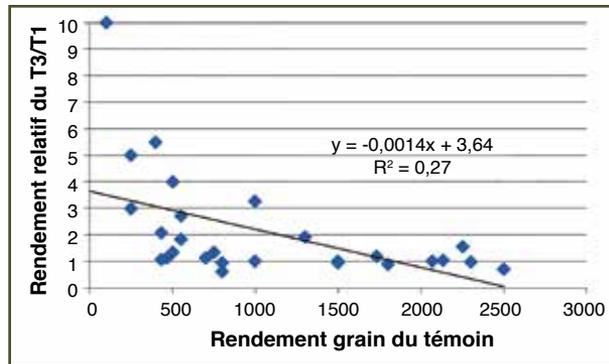


Figure 5 : Rendement relatif du mil T3/T1 pour les sites, 2007 et 2008

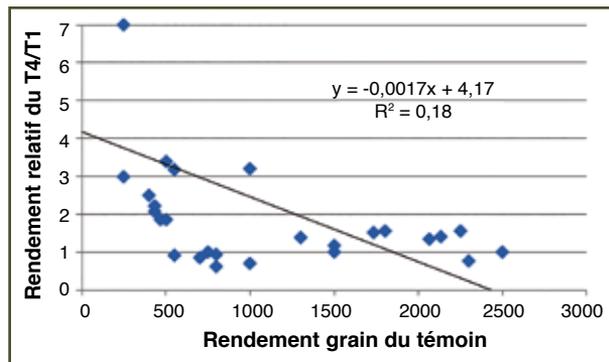


Figure 6 : Rendement relatif du mil T4/T1 pour les sites, 2007 et 2008

Toutefois, il est plus logique d'introduire le trempage des semences et le microdosage dans les zones à faible rendement même si l'augmentation absolue du rendement est la même. La raison en est que l'augmentation de rendement liée au trempage des semences et au microdosage est moins visible au niveau de rendements élevés alors que les producteurs peuvent facilement être convaincus de l'effet dans les zones où les rendements sont faibles. Le surplus de rendement grains et le rendement en paille correspondant obtenus dans de telles conditions marginales peuvent également être très précieux.

Risques du trempage des semences et du microdosage

La figure 7 montre la probabilité cumulée du revenu brut des différents traitements du sorgho pour les années 2007 et 2008. Il ressort que la probabilité d'avoir un bénéfice net bas (inférieur à 75 000 F CFA/ha) est la même dans les différents traitements.

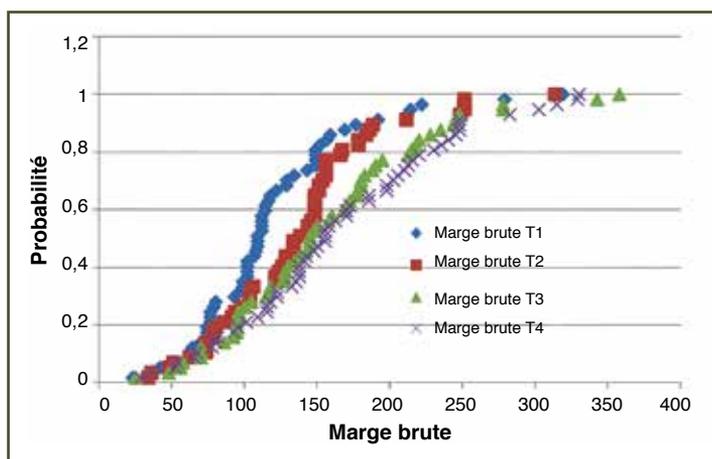


Figure 7 : Probabilité cumulative de revenu brut (x 1000 F CFA) pour les traitements T1, T2, T3 et T4 pour le sorgho, 2007 et 2008

L'utilisation de la technique du microdosage de l'engrais NPK et du trempage des semences ne constitue donc pas un risque pour le paysan. On observe que pour le traitement témoin (T1), environ 20 % des agriculteurs ont obtenu un bénéfice net supérieur à 150 000 F CFA/ha alors que pour le Trempage des semences + 12,5 kg de NPK/ha ; et le Trempage des semences + 50 kg NPK/ha, environ 50 % des agriculteurs ont obtenu une marge brute supérieure à 150 000 F CFA. Il y a donc une probabilité

plus élevée que les agriculteurs obtiennent un avantage élevé en combinant le trempage des semences et le microdosage. Il n'y a qu'une différence mineure entre la répartition du revenu entre les traitements T3 (Trempage des semences + microdosage de l'engrais à 0,5 g par poquet (soit 12,5 kg/ha NPK 15-15-15)) et T4 (Trempage des semences + microdosage de l'engrais à 2 g par poquet (50 kg/ha NPK 15-15-15)), ce qui démontre que les agriculteurs peuvent choisir une application de 0,3 g par poquet au lieu de 2 g par poquet. Pour les agriculteurs qui pratiquent le trempage des semences, environ 35 % ont un revenu supérieur à 150 000 F CFA/ha.

La même distribution des probabilités de la marge brute a été observée sur le mil et le sorgho, mais ici, la réponse aux traitements a été plus faible sur le mil que sur le sorgho.

Effets du trempage des semences plus microdosage avec traitement insecticide/fongicide et apport d'urée au tallage sur les rendements du sorgho et du mil (Expérimentation 2)

Dans le deuxième essai sur l'intensification agricole mené de 2011 à 2015, il a été inclus le traitement des semences et l'apport d'urée au tallage. L'utilisation de 2 g d'engrais par poquet a été abandonnée car on a trouvé dans la première série d'expérimentations que cette dose était trop élevée.

Cette expérimentation a montré un bon effet du niveau d'intensification mais les résultats ont varié entre les sites. Les effets de l'intensification ont été les plus forts pour le site de Sotuba avec des conditions pluviométriques plus favorables et des rendements plus élevés par rapport au site de Koporo Pen dans la région de Mopti.

Les observations sur les plants à Sotuba ont montré qu'il y avait en général une amélioration de la levée et du développement des cultures en fonction des niveaux croissants d'intensification (Tableau 6). Cependant, il est apparu que les effets étaient plus visibles au début de la saison que plus tard en milieu de croissance. Il y avait un effet sur le nombre de poquets germés 3 jours après le semis, le diamètre de la tige et la hauteur des plants 30 jours après le semis. Ces résultats montrent que les techniques proposées ici sont particulièrement adaptées pour améliorer la levée des cultures.

Tableau 6 : Effets des niveaux d'intensification sur la levée et la croissance du sorgho, Sotuba, Koulikoro, 2011-2015

Traitement	Plants/ha 3 JAS	Diamètre tige 30 JAS (cm)	Hauteur 30 JAS (cm)	Hauteur floraison (cm)	Poquets récoltés
Témoin	15 800	9,5	38,8	125	25 075
Trempage des semences (TS)	16 600	8	33,8	118	21 907
TS + Traitement des semences (tS)	16 800	9,5	38,5	128	25 848
TS + tS + microdose 5 kg NPK/ha semis (Ms)	17 100	10,4	39,5	123	25 271
TS + tS + microdose 5 kg NPK/ha semis (Ms) + microdose 5 kg NPK/ha tallage (Mt)	18 000	11,3	43,5	127	26 049
TS + tS + microdose 5 kg NPK/ha semis (Ms) + 25kg urée/ha au tallage	18 600	11,6	42,4	129	26 996
Probabilité	0,05	0,001	0,002	NS	NS

JAS : jours après semis ; M : microdose ; NS = non significatif ; *Significatif au seuil de 5% ; ** Significatif au seuil de 1%.

L'effet sur le rendement des cultures était similaire aux observations sur le développement des cultures à Sotuba (Tableau 7). Pour ce site, le niveau d'intensification le plus élevé a augmenté le rendement moyen des quatre années de 893 kg/ha (augmentation de rendement de 76%) par rapport au témoin. Il n'y a eu aucun effet du trempage des semences à ce site, ce qui est conforme aux résultats précédents selon lesquels le trempage des semences donne les meilleurs résultats dans des conditions de faible pluviosité (Aune et Ousman, 2011). L'effet le plus apparent sur ce site est celui du traitement où l'urée augmente le rendement moyen de 541 kg/ha comparativement aux autres niveaux d'intensification (Tableau 7). Ceci a clairement montré que l'azote était un facteur limitant les rendements sur ce site. Les autres facteurs qui ont contribué à augmenter le rendement ont été le traitement des semences et le microdosage au semis.

Tableau 7 : Effets des niveaux d'intensification sur le rendement (kg/ha) du sorgho, Sotuba, Koulikoro, 2011-2015

Traitement	2011	2012	2013	2014	Moyenne
Témoin	1 451	760c	750c	1 737	1 175c
Trempage des semences (TS)	1 029	836c	970c	1 850	1 171c
TS + Traitement semences (tS)	807	1 028bc	1 029b	2 192	1 264c
TS + tS + microdose 5 kg NPK/ha au semis (Ms)	976	1 248b	1 323b	1 975	1 381bc
TS + tS + microdose (Ms) 5 kg NPK/ha au tallage (Mt)	1 107	1 680b	1 544b	1 775	1 527b
TS + tS + Ms + 25 kg urée/ha au tallage	1 302	2 656a	2 147a	2 170	2 068a
Déviati on Standard	274	290	264	169	141
Probabilité	NS	0,001	0,001	NS	0,0001

TS : trempage des semences ; tS : traitement des semences ; M : microdose ; NS = non significatif.

Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% par le test de Duncan.

Sur le site de Koporo Pen, dans la région de Mopti, il n'y a pas eu d'effet de NPK ou d'urée alors que le microdosage a eu un bon effet au début de la saison (Tableau 8). Sur ce site, la différence de rendement entre le témoin et le traitement avec le rendement le plus élevé a été de 387 kg/ha (augmentation de 70 %). C'était le traitement qui comprenait le microdosage au semis. Ceci a montré que l'avantage de rendement est nettement plus élevé dans des conditions plus favorables à Sotuba dans la région de Koulikoro par rapport aux conditions plus défavorables à Koporo Pen dans la région de Mopti. Cependant, l'augmentation du rendement relatif est à peu près la même pour les deux sites. Contrairement au résultat précédent dans la région de Mopti (Aune *et al.*, 2007), il n'y avait aucun effet du trempage des semences, mais il y avait un effet de traitement des semences avec un fongicide/insecticide.

Tableau 8 : Effets des niveaux d'intensification agricole sur le rendement grains (kg) du mil, Koporo Pen, Mopti

Traitements	2011	2012	2013	2014	Moyenne
Témoin	975	490b	650c	88	550b
Trempage des semences (TS)	913	625b	625c	100	565b
TS + Traitement semences (tS)	1 075	716ba	563c	125	620b
TS + tS + microdose 5 kg NPK/ha semis (Ms)	1 350	810ba	988b	600	937a
TS + tS + Ms + microdose 5 kg NPK/ha au tallage (Mt)	1 375	903a	925b	463	916a
TS + tS + Ms + 25 kg urée/ha au tallage	1 400	890ba	1050a	375	929a
Déviati on Standard	274	290	264	135	83
Probabilité	0,62	0,01	0,001	0,06	0,001

Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% par le test de Duncan ; Ms = microdose 5kg NPK/ha au semis ; Mt = microdose 5 kg NPK/ha au tallage.

Évaluation économique de l'échelle d'intensification

Les données sur le rendement, les prix des intrants et la production ont servi à calculer la rentabilité économique en termes de revenu brut et de rapport valeur sur coût (RVC). Pour le site de Sotuba, le niveau d'intensification le plus élevé a augmenté le revenu d'environ 100 000 F CFA/ha, soit une augmentation de 71 % de la marge brute. C'est surtout l'apport d'urée au tallage qui a augmenté la marge brute. Le traitement des semences avec un insecticide/fongicide a augmenté le revenu brut d'environ 11 000 F CFA/ha, ce qui correspond à un RVC de 42,4 qui montre que le traitement des semences est un très bon investissement économique. Le niveau d'intensification le plus élevé a donné un RVC de 17,1 qui est bien au-dessus de la valeur seuil de 2.

À Koporo Pen, le traitement qui était le meilleur en termes de marge brute et de RVC a été le traitement comprenant le trempage, le traitement phytosanitaire des

semences et le microdosage au semis. Ce traitement a augmenté la marge brute de 38 000 F CFA/ha par rapport au témoin et a donné un RVC de 63,1, ce qui est un très bon retour sur investissement. Quant au site de Sotuba, il y a eu un très bon retour sur investissement dû au traitement des semences. Comme indiqué au tableau 9, l'apport d'urée au tallage n'a pas augmenté le RVC.

Les résultats de ces deux sites ont montré qu'il existe de bonnes perspectives d'intensification du sorgho et du mil à Sotuba et à Kopro Pen (en zone sahélienne). Cependant, le niveau approprié pour l'intensification variera. Pour le site de Sotuba (en zone soudanienne), le niveau d'intensification le plus élevé qui incluait l'épandage d'engrais de fond au semis et l'urée au tallage a donné le meilleur résultat alors qu'à Kopro Pen, l'intensification avec microdosage au semis semblait être le niveau d'intensification le plus approprié (Tableau 9).

Tableau 9 : Effets des niveaux d'intensification agricole sur le revenu marginal et le RVC sur le sorgho à Sotuba et le mil à Kopro Pen, Mopti

Traitements	Sorgho – Sotuba		Mil – Kopro Pen	
	Revenu marginal en F CFA	RVC	Revenu marginal	RVC
Témoin	139 825		65 450	
Trempage des semences (TS)	139 349		67 235	
TS + Traitement semences (tS)	150 166	42,4	73 530	33,3
TS + tS + microdose 5 kg NPK/ha (Ms)	162 989	33,6	110 153	63,1
TS + tS + Ms + microdose 5 kg NPK/ha au tallage (Mt)	179 263	17,1	106 554	17,8
TS + tS + Ms + 25 kg urée/ha au tallage	239 242	15,5	103 701	6,6

RVC = Rapport Valeur sur Coût; Ms = microdose 5 kg NPK/ha au semis; Mt = microdose 5 kg NPK/ha au tallage.

Conclusion

Les résultats de ces deux séries d'expérimentations montrent qu'il existe une bonne opportunité d'intensification agricole dans l'agriculture pluviale au Mali. Dans les deux séries d'expériences, le sorgho a mieux réagi que le mil à un niveau d'intensification croissant. La première série d'expérimentations a montré que l'application de 0,5 g d'engrais/poquet est une dose plus appropriée que l'application de 2 g d'engrais par poquet comme recommandé par l'ICRISAT. C'est particulièrement le cas pour l'application d'engrais sur le mil. L'augmentation du rendement relatif due aux traitements était plus élevée lorsque les niveaux de rendement des témoins sur les sites étaient faibles. Cela rend le trempage des semences et les technologies de microdosage particulièrement appropriés pour les conditions de faible pluviosité. Cependant, l'effet des traitements

en termes de rendement en kg/ha est le même à des niveaux de rendement plus élevés, ce qui indique que l'intensification est également possible dans de meilleures conditions environnementales. Une évaluation des risques des technologies a montré qu'il n'y a pas de différence entre les traitements quant à la probabilité d'obtenir une faible marge brute, alors qu'il semble que la probabilité d'obtenir une marge brute élevée est significativement plus élevée lorsque le trempage des semences et le microdosage sont pratiqués. Le trempage des semences et le microdosage n'augmentent donc pas le risque des agriculteurs, mais augmentent les probabilités d'obtenir des revenus élevés.

La deuxième série d'expériences a également montré l'importance du trempage des semences plus un traitement fongicide/insecticide. Cette expérimentation a montré que le niveau d'intensification approprié varie d'une région à l'autre. Dans les régions où la pluviosité est bonne, comme dans la région de Koulikoro, il y a une très bonne réponse à l'apport d'urée au tallage alors que dans la région de Mopti avec moins de précipitations, il n'y a pas de réponse à l'apport d'urée au tallage.

Ces expérimentations ont montré qu'il existe une bonne opportunité d'intensification de la production agricole à moindre coût au Mali. Dans les zones à forte pluviosité, il est possible de procéder à des niveaux élevés d'intensification et d'utiliser l'apport de l'urée au tallage dans le cadre de l'intensification alors que dans les zones de faible pluviosité, l'intensification ne devrait pas aller au-delà d'un traitement avec un insecticide/fongicide et une application de 0,5 g d'engrais NPK par poquet.

Références

- Aune J.B., Bationo A., 2008. L'intensification agricole au Sahel - L'approche par échelle. *Agr. Syst.* 98: 119-125.
- Aune J.B., Doumbia M. & Berthé A., 2007. Microfertilizing sorghum and pearl millet in Mali 2007. *Outlook on Agriculture* 36: 199-203.
- Aune J.B. & Ousman A., 2011. Effect of seed priming and microdosing of fertilizer on sorghum and pearl millet in Western Sudan. *Experimental Agriculture* 47: 419-430.
- Aune J.B., Traoré C.O., Mamadou S., 2012. Low-cost technologies for improved productivity of dryland farming in Mali. *Outlook Agr* 41:103-108.
- Bationo A., Fairhurst T., Giller K., Kelly V., Lunduka R., Mando A., Mapfumo P., Odour G., Romney D., Vanlauwe B., Wairegi L. & Zingoré, S., 2012. Handbook for integrated soil fertility management. African soil health consortium, CABI International, 149 p.
- Bayaert R.P. & Roy R.C., 2005. Influence of Nitrogen Fertilization on Multi-Cut Forage Sorghum–Sudangrass. Yield and Nitrogen Use. *Agronomy Journal* 97:1493-1501.

- Birch, H.F., 1958. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and Soil* 10:9.
- Bielders C.L. and Gerard B., 2015. Millet response to microdose fertilization in south-western Niger: Effect of antecedent fertility management and environmental factors. *Field Crops Research* 171:165-175.
- Buerkert A., Bationo A. & Piepho H.P., 2001. Efficient phosphorus application strategies for increased crop production in sub-Saharan West Africa. *Field Crops Research* 72: 1-15.
- FARA, 2009. AGRA launches micro dosing fertilizer project. <http://farastaff.blogspot.nl/2009/12/agra-launches-microdosing-fertilizer.html>.
- Harris D., Pathan A. K., Gothkar P., Joshi A., Chivasa W. and Nyamudeza P., 2006. On-farm seed priming: using participatory methods to revive and refine a key technology. *Agricultural Systems*, 69, Issues 1-2, July-August 2006: 151-164.
- Harris D., 2006. Development and testing of “on-farm” seed priming. *Advances in Agronomy* 90: 129-178.
- ICRISAT, 2012. Fertiliser microdosing. [http://www.icrisat.org/jewels/Posters/Fertilizer Microdosing.pdf](http://www.icrisat.org/jewels/Posters/Fertilizer%20Microdosing.pdf).
- Kelly V., Reardon T., Yangen D. & Naseem A., 2006. Fertilizer in sub Saharan Africa: Breaking the vicious circle of high prices and low demand. *Policy Synthesis n° 32*. MSU Agricultural Economics. USA.
- Konaté M., 1984. Etude de l'environnement avec référence spéciale au climat des zones de culture du sorgho et du mil des régions tropicales semi-arides d'Afrique occidentale. In *Agro meteorology of Sorghum and Millet in the Semi-Arid Tropics*. Proceedings of the International Symposium, ICRISAT Center Patancheru, India 15-20 November, 1982.
- Penning de Vries F.W.T., 1982. La fertilisation et l'irrigation. In : *La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle*, (Penning de Vries F.W.T. and Djitéye M.A. (Eds.), Wageningen, PUDOC, p. 425-434.
- PIRT, 1983. *Projet Inventaire des Ressources Terrestres du Mali. Les ressources terrestres du Mali*. Government of Mali/USAID/TAMS, New York.
- Sawadogo H., 2011. Using soil and water conservation techniques to rehabilitate degraded lands in northwestern Burkina Faso. *International Journal of Agricultural Sustainability* 9: 120-128.
- Subbarao G.V., Renard C., Paynes W.A. & Bationo A., 2000. Long-term effects of tillage, phosphorus fertilization and crop rotation on pearl millet-cowpea productivity in the west-African Sahel. *Experimental Agriculture* 36: 243-264.
- Yamoah C.F., Bationo A., Shapiro B. & Koala S., 2002. Trend and stability of millet yields treated with fertilizer and crop residues in the Sahel. *Field Crops Research* 75: 53-62.

