

L'Agriculture de Précision : une option d'amélioration de la productivité des terres et du travail en zone soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest

Precision farming: An Option for Improving Land and Labor Productivity in the Sudano-Sahelian Zone of West Africa

Aune Jens Bernt¹, Coulibaly Adama² et Kamkam Woumou²

¹Département des Études Internationales pour le Développement et l'Environnement, Noragric, Université des Sciences de la Vie, Ås, Norvège

²Laboratoire Sol, Eau, Plante, Institut d'Économie Rurale - BP 258, Bamako, Mali

*Auteur pour la correspondance : jens.aune@nmbu.no

Résumé

Les agriculteurs de la zone sahélo-soudanienne sont confrontés à des difficultés liées à l'établissement des cultures, à la variabilité des précipitations, à une faible fertilité des sols et à des pénuries de main-d'œuvre en périodes de forte demande. Dans de telles conditions, il est important que les ressources soient utilisées de la manière la plus efficace possible. Il est examiné ici l'intensification agricole dans la zone sahélo-soudanienne en utilisant les principes de l'Agriculture de Précision. L'idée est de créer un microenvironnement favorable dans le poquet et d'assurer un semis et un sarclage aux moments opportuns. Dans le contexte de l'Agriculture de Précision dans la zone sahélo-soudanienne, cela signifie :

- 1) sélectionner de bonnes graines, tremper les semences et les traiter avec un insecticide/fongicide; le trempage des graines augmente le rendement de l'ordre de 20 à 30 % alors que le traitement phytosanitaire des semences augmente le rendement de 15 %;
- 2) appliquer les engrais minéraux à de très faibles doses: 0,3g par poquet permet d'augmenter le rendement de plus 50 %;
- 3) appliquer de façon précise les semences et les engrais par la mécanisation à l'aide d'un semoir à traction animale ou motorisée;
- 4) mécaniser les opérations agricoles plus fréquentes et trop chargées (semis et sarclage);
- 5) appliquer les techniques de captage de l'eau telles que les zaï et les cordons pierreux, importantes sur les sols qui s'encroûtent facilement avec des taux élevés de ruissellement;
- 6) utiliser les ressources agricoles avec parcimonie afin d'assurer une utilisation efficace de ressources limitées. Cela implique le microdosage de l'engrais sur différentes cultures (sorgho et mil) et sols, le semis séquentiel des cultures en fonction de leur sensibilité au semis retardé et à l'apport de fumure organique aux sols de faible fertilité.

Cette forme d'Agriculture de Précision représente une approche à faible coût pour l'intensification agricole qui permettra d'accroître la productivité des terres et du travail. L'approche est applicable à toutes les exploitations dans les zones sahéliennes et soudaniennes de l'Afrique de l'Ouest.

Mots-clés : intensification agricole, microdosage, mécanisation, semoir.

Abstract

Farmers in the Sudano-sahelian zone face challenges related to crop establishment, rainfall variability, low soil fertility and labor shortages during peak demand periods. In such circumstances, it is important that resources are used in the most efficient way. In this chapter, we discuss agricultural intensification in the Sudano-sahelian zone based on the principles of precision agriculture. The idea is to create a suitable microenvironment in the hole and ensure timely seeding and weeding. In the context of precision agriculture in the Sudano-sahelian zone, this means:

- (1) selecting good seeds, priming them and treating them with insecticide/fungicide; the priming of seeds increases the yield by 20-30%, whereas the phytosanitary treatment of seeds increases it by 15%;*
- (2) applying very low doses of mineral fertilizers: 0.3 g per hole makes it possible to increase the yield by more than 50%;*
- (3) a precise application of seeds and fertilizers through mechanization in the form of an animal- or mechanically-drawn seeder;*
- (4) more frequent and overloaded agricultural operations that can be achieved through a mechanization of sowing and weeding;*
- (5) using water harvesting techniques such as zaï and stone bunds which are important on soils that are easily encrusted and with high rates of runoff;*
- (6) using the scarce agricultural resources sparingly to ensure an efficiency. This may involve targeting micro-dosing to different crops (sorghum – more aggressive than millet) and soils, sequential planting of crops based on their susceptibility to delayed seeding and organic input to low fertility soils.*

This form of precision agriculture represents a low-cost approach to agricultural intensification that will help increase the productivity of land and labor. This approach is applicable to all farms in the Sudano-sahelian zone of West Africa.

Key words: agricultural intensification, micro-dosing, mechanization, seeder.

Introduction

L'Agriculture dans les zones sahélo-soudaniennes est pratiquée dans des conditions agro-écologiques difficiles caractérisées par de grandes variabilités des paramètres climatiques (pluviosité faible et imprévisible, températures élevées), la faible fertilité des sols et les attaques de nuisibles tels que les insectes, les maladies et les mauvaises herbes. Les producteurs sont aussi confrontés aux contraintes de capitaux, de main-d'œuvre et de pressions foncières. Les services publics d'encadrement manquent de moyens, ce qui entrave l'accès des producteurs à la vulgarisation, au crédit. Le caractère aléatoire des marchés rend difficile la planification des activités agricoles. Dans ces conditions, il est important de mettre au point pour les producteurs des pratiques agricoles qui permettent une utilisation efficiente/efficace des ressources et une réduction des risques. Dans ce document, le terme zone sahélo-soudanienne se réfère à la zone sahélienne et à la zone sahélo-soudanienne de l'Afrique de l'Ouest recevant respectivement 250-500 mm et 500 à 900 mm de pluie par an (FAO, 2006).

L'Agriculture de Précision est une approche qui améliore l'utilisation efficiente des ressources jusqu'ici mise en pratique seulement dans les exploitations commerciales. L'utilisation des prévisions météorologiques, du *Global Positioning System* (GPS) (Système mondial de positionnement), du Système d'Information Géographique (SIG), de la télédétection et de la mécanisation agricole avancée rend l'Agriculture de Précision de plus en plus attrayante pour les exploitants commerciaux (Tiwarei et Jaga, 2012). L'utilisation efficiente des ressources est un important facteur de l'Agriculture de Précision en zone soudano-sahélienne dont une version plus simplifiée est l'objet du présent document.

Les avantages de l'Agriculture de Précision comprennent des opérations agricoles plus rapides (semis, application de pesticides, désherbage et récolte), une application de l'engrais et de l'irrigation tenant compte des propriétés du sol, de la pluviosité et des techniques de protection des cultures (Tiwarei et Jaga, 2012). Les exploitants agricoles de la zone soudano-sahélienne utilisent déjà des éléments de l'Agriculture de Précision tels que les variétés à haut rendement, la bonne terre et le paillage sur des sols dégradés (Lamers *et al.*, 1998). Cependant, le concept de l'Agriculture de Précision est rarement utilisé dans le contexte de l'agriculture pluviale. Il y a une connaissance de base assez solide des contraintes agro-écologiques affectant l'agriculture en zone soudano-sahélienne et des technologies palliant ces contraintes ont été développées.

Ces technologies comprennent les variétés améliorées, le trempage des semences, le microdosage, l'épandage de fumier, le paillage, l'introduction d'arbres et la production

de fourrage (Schlecht *et al.*, 2006; Aune et Bationo, 2008). Cependant, malgré cette masse de connaissances et la disponibilité des technologies, l'adoption des pratiques agronomiques améliorées a été lente. Il semble qu'il y ait un défi pour mettre au point des technologies qui conviennent au système agricole existant. Les technologies comme le paillage et la plantation d'arbres sont particulièrement difficiles à mettre en œuvre en raison du système de pâturage libre qui prévaut dans la zone sahélo-soudanienne après la récolte des cultures.

La façon dont les cultures sont pratiquées dans la zone sahélo-soudanienne fait de l'Agriculture de Précision une option réalisable. Le sorgho et le mil qui sont les principales cultures dans la zone sont semés à une faible densité variant de 5 000 poquets par hectare dans une condition marginale sahélienne à 25 000 poquets par hectare dans des conditions plus favorables dans la zone soudanienne (Memento de l'agronome, 2009). Ces faibles densités de semis permettent d'appliquer l'intrant uniquement au poquet. Cela crée un microenvironnement aux alentours du plant où il y a une plus grande concentration de nutriments et de l'eau. Les ressources et les intrants sont rares dans les zones sahélienne et soudanienne et c'est donc une technique agronomique judicieuse qui consiste à concentrer les ressources/intrants à proximité du plant plutôt que d'épandre les intrants dans l'ensemble du champ. Cette pratique favorise les effets du traitement des semences, l'utilisation des engrais organiques et minéraux, l'utilisation de fongicides/insecticides et la mécanisation. Ce microenvironnement favorable peut assurer une levée rapide et uniforme de la culture, réduisant ainsi les ressemis.

L'Agriculture de Précision dans les régions sahélo-soudanienne devrait non seulement accroître le rendement et le revenu des producteurs mais aussi rendre l'agriculture moins vulnérable aux risques et réduire la charge de travail.

Ce document examine les études existantes sur la gestion des cultures et des sols dans les zones arides de l'Afrique de l'Ouest et fait la synthèse des résultats sur l'utilisation des principes de l'Agriculture de Précision. L'étude évalue comment les différentes technologies peuvent être combinées pour une plus grande productivité des terres et un allègement du travail.

L'agriculture dans la région sahélo-soudanienne est pratiquée dans des conditions agro-écologiques difficiles caractérisées par une forte variabilité des paramètres climatiques (précipitations insuffisantes, imprévisibles et températures élevées), une faible fertilité des sols, une attaque des ravageurs, des maladies et une infestation des mauvaises herbes. Les agriculteurs sont en outre confrontés à des contraintes de fonds (revenus), de main-d'œuvre et de terres. Les services publics manquent de moyens, limitant l'accès des

agriculteurs aux services de vulgarisation, aux infrastructures et au crédit. Les marchés sont imprévisibles, rendant difficile aux producteurs la planification de leurs activités agricoles. Dans de telles conditions, il est important de développer des pratiques agricoles qui rendent efficace l'utilisation des ressources et réduisent les risques pour les exploitations. La notion de zone sahélo-soudanienne est dans cet article définie comme étant la zone sahélienne et la sahélo-soudanienne de l'Afrique de l'Ouest recevant respectivement 250-500 mm et 500-900 mm de précipitations par an (FAO, 2006).

L'Agriculture de Précision est une approche visant à accroître l'efficacité de l'utilisation des ressources, mais elle est jusqu'ici principalement pratiquée dans les exploitations commerciales. Le développement de meilleures prévisions météorologiques, les systèmes de positionnement GPS, la technologie SIG, la technologie de télédétection et des machines agricoles plus perfectionnées font de l'Agriculture de Précision une activité de plus en plus attrayante pour les agriculteurs commerciaux (Tiwari et Jaga, 2012). L'utilisation efficace des ressources est également au centre de l'Agriculture de Précision dans la zone sahélo-soudanienne, mais ici c'est une version plus simplifiée de cette forme d'agriculture qui est présentée.

Principes de l'Agriculture de Précision dans la zone sahélo-soudanienne

Dans ce qui suit, seront discutés les principes de cette agriculture dans la zone sahélo-soudanienne fondés sur le traitement des semences, le microdosage, la gestion des matières organiques, le captage de l'eau et l'utilisation des prévisions météorologiques. La durabilité de l'approche proposée pour l'Agriculture de Précision dans la zone sahélo-soudanienne sera enfin discutée. Nous ne discuterons pas des possibilités d'utiliser des variétés améliorées, la télédétection et le GPS pour orienter la gestion de la fertilité des sols.

Traitement des semences

La bonne qualité de la semence est un fondement pour l'établissement uniforme et rapide de la culture. Une méthode qui est relativement nouvelle dans l'agriculture pluviale est le trempage des semences. Le trempage des semences a été testé au Mali et au Soudan avec de bons résultats et son effet est également documenté dans d'autres régions tropicales (Harris, 2006). Les résultats en zone sahélo-soudanienne ont montré que le trempage des semences de mil et de sorgho pendant huit heures dans l'eau avant le semis peut raccourcir le temps de germination d'un à deux jours et assurer une levée plus uniforme des cultures. Le trempage des semences s'est avéré particulièrement

efficace dans les conditions rigoureuses comme dans le Sahel (Aune *et al.*, 2012). Le trempage des semences peut être appliqué à la plupart des cultures vivrières en zone sahélo-soudanienne (Photo 1). Au Soudan, on a constaté que le trempage des semences augmentait le rendement par rapport au témoin en champs paysans de 107 kg/ha (32 %), 71 kg/ha (30 %), 135 kg/ha (18 %) et 86 kg/ha (26 %) respectivement pour le sorgho, le mil, l'arachide et le niébé (Aune et Ousman, 2011; Ousman et Aune, 2011). Les essais en station sur le trempage des semences au Mali ont montré que le trempage des semences augmentait le rendement de 159 kg/ha (19%) et de 99 kg/ha (30%) pour le sorgho et le mil respectivement. Le trempage des semences augmente donc le rendement de l'ordre de 20 à 30 % pour les principales cultures de la zone sahélo-soudanienne.



Photo 1 : Effets du trempage des semences sur le développement phénologique du sorgho en champ paysan, Konobougou, Ségou, Mali

Le trempage des semences peut commencer dès que l'humidité du sol permet de semer. S'il pleut le soir il est possible de commencer le trempage des semences pendant la nuit et semer le lendemain matin. Les semences doivent être séchées pendant environ une à deux heures après le trempage afin de faciliter le processus de semis manuel car cette courte période de séchage réduit l'adhérence des graines, facilitant ainsi le processus de semis. Les semences apprêtées peuvent être traitées après le trempage avec de l'insecticide/fongicide associé pour assurer une bonne protection pendant les premiers stades du développement de la culture (Photo 2).



Photo 2 : Semences traitées au fongicide/insecticide (Perméthrine 25 g/kg – Thirame 250 g/kg)

Les cultures en zones sahélienne et soudano-sahélienne sont également attaquées par de nombreux ravageurs et maladies. Il est moins coûteux et plus respectueux de l'environnement de traiter les graines au lieu de l'ensemble du champ avec des fongicides/pesticides. Au Mali, on a montré que le traitement des graines avec un insecticide/fongicide associé (Apron star ou Caïman rouge) donnait une augmentation moyenne du rendement du sorgho et du mil de 167 kg/ha (21 sites), ce qui correspondait à une augmentation de rendement de 15 % (Aune *et al.*, 2012).

La grosseur des graines a également été jugée importante pour l'établissement des cultures, car les grosses graines de mil qui avaient une levée plus rapide, augmentaient le poids sec des tiges et des racines secondaires plus que les graines moyennes et petites (Klajj et Hoogmoed, 1993). Une expérience en laboratoire sur le mil et le sorgho a également montré que des graines plus denses et plus grosses avaient un développement plus rapide de plantules (Mortlock et Vanderlip, 1989).

Microdosage d'engrais minéral

Le rendement des cultures en zone sahélo-soudanienne est principalement limité par les carences en azote (N) et en phosphore (P) (Schlecht *et al.*, 2006). L'importance de P par rapport à N comme facteur limitatif augmente dans les régions Nord de la zone sahélo-soudanienne avec moins de précipitations (Buerkert *et al.*, 2001).

Les recommandations d'engrais pour ce secteur sont largement basées sur la diffusion de l'engrais minéral. Depuis les années 1990, une plus grande attention a été accordée à l'application de l'engrais minéral en microdoses. Cette méthode consiste à appliquer une petite quantité d'engrais dans le poquet ou à proximité de celui-ci. Il s'agit d'une forme d'application précise de l'engrais menant à une utilisation plus efficace, à un rendement plus élevé et à une meilleure rentabilité économique. Il existe différentes façons de pratiquer le microdosage. Une méthode qui a été développée par l'ICRISAT dans les années 1990 consiste à appliquer 2 g de phosphate d'ammoniac ou 6 g de NPK par poquet. Si la densité de semis est de 10 000 poquets/ha, cela correspond à 20 kg de DAP ou 60 kg de NPK (15-15-15) par hectare. Ces doses ont donné une augmentation moyenne du rendement grains en milieu paysan au Niger d'environ 118 % pour le mil (Buerkert *et al.*, 2001). Une étude menée à travers le Mali, le Burkina Faso et le Niger a montré que le microdosage de 4 à 6 g de NPK par poquet (100 et 150 kg/ha) produisait des rendements supérieurs ou égaux à ceux de 100 à 125 kg d'engrais appliqués à la volée (Tabo *et al.*, 2006). En microdosage, pour le sorgho, le rendement a augmenté de 330 kg/ha et de 491 kg/ha dans la zone sahélienne (400-600 mm) et dans la zone sahélo-soudanienne (600 à 1 000 mm) respectivement (Tabo *et al.*, 2006).

Il apparaît donc que le microdosage peut être utilisé plus efficacement dans les zones les plus humides des terres arides de l'Afrique de l'Ouest.

La rentabilité économique du microdosage avec 2 g de DAP par poquet a récemment été remise en question par Bielder et Gérard (2015). Ces derniers ont constaté que 36% des parcelles de démonstration avaient un ratio valeur-coût inférieur à 1 (pas rentable) et pour les parcelles témoins à rendement élevé (> 400 kg/ha), 55% des parcelles avaient un ratio inférieur à 1. Ils indiquent que des doses de microdoses plus faibles peuvent être justifiées. Ils ont également montré que l'application des microdoses donne de meilleurs résultats lorsque les microdoses sont appliquées à des semis tardifs.

Une méthode à moindre coût pour le microdosage a été développée au Mali et au Soudan en utilisant des doses aussi petites que 0,2 g d'engrais par poquet. Cette méthode donne des rendements inférieurs à ceux des doses de 2 à 6 g par poquet, mais les dépenses en capital et les risques sont beaucoup moins élevés. Le rendement pour le mil au Mali a augmenté de 56% et 133% respectivement avec 0,3 g et 6 g d'engrais NPK 15-15-15 utilisé par poquet (Aune *et al.*, 2007). Pour le sorgho, le rendement a augmenté de 56% avec 0,3 g par poquet alors qu'il a augmenté de 74% avec la méthode de 6 g/poquet. Toutefois, le ratio valeur-coût (RVC) de ces expérimentations a varié de 3,4 à 11,9 pour 0,3 g/poquet alors que le RVC a varié de 0,43 à 1,17 avec 6g/poquet d'engrais NPK. Cela confirme également la conclusion de Bielder et Gérard (2015) selon laquelle les doses d'application plus élevées de microdoses peuvent ne pas être rentables.

Différentes faibles doses de microdoses ont été testées dans l'État du Nord-Kordofan au Soudan avec des conditions agro-écologiques similaires à celles du Sahel ouest-africain. Ici, la dose d'engrais de 0,3 g par rapport à un témoin sans engrais a augmenté le rendement du mil et du sorgho de 33 et 50% respectivement (Aune et Ousman, 2011). Pour le sorgho, les doses supérieures à 0,9 g d'engrais/poquet ont augmenté le rendement tandis que pour le mil il n'y avait pas d'augmentation de rendement au-delà de 0,3 g d'engrais par poquet.

La recommandation de l'ICRISAT (2009) d'utiliser 2 g de DAP ou 6 g de NPK (donne la même quantité de P que 2 g de DAP) se traduira par une dose d'engrais assez élevée, en particulier quand il y a 25 000 poquets par hectare comme c'est le cas dans le centre du Mali. Cela correspond à 50 kg d'engrais/ha lorsque le DAP est utilisé ou 150 kg/ha lorsque le NPK est utilisé. Cette dernière dose est encore plus élevée que la recommandation nationale fondée sur l'épandage à la volée. La difficulté supplémentaire avec l'application des doses plus élevées est que la demande en main-

d'œuvre augmente car une personne supplémentaire est nécessaire pour appliquer l'engrais. Au Mali, on a constaté que la demande de travail au semis passe de 5 heures/ha pour l'application de 0,3 g à 14,6 heures/ha pour l'application de 6 g (Aune *et al.*, 2007). Lorsque de petites quantités comme 0,3 g d'engrais par poquet sont appliquées, il est possible de mélanger l'engrais et les semences dans un rapport 1:1 et ce mélange peut alors être semé. Un avantage supplémentaire est qu'il est possible de mécaniser l'application de cette faible dose d'engrais en utilisant le semoir traditionnel puisque l'engrais et les graines peuvent être mélangés et semés simultanément. Il est également possible de mécaniser l'application des doses d'engrais plus élevées, mais cela nécessite une application supplémentaire ou l'utilisation de semoirs à trémie séparée pour les semences et les engrais.

Les recherches au Mali et au Soudan ont montré que le trempage des semences et les microdoses d'engrais rendent le microdosage plus avantageux et sécurise l'investissement (Aune *et al.*, 2012 ; Aune et Ousman, 2011). Les doses moyennes de microdose de 0,3, 0,6 et 0,9 g/poquet augmentent le rendement du sorgho de 24 et 132 % par rapport au témoin absolu sans trempage (Aune et Ousman, 2011). Les rendements correspondants sur le mil ont augmenté de 18 et 55 % par rapport au semis sans trempage et au semis après trempage respectivement.

Une question relative au microdosage est la suivante : quel type d'engrais utiliser lorsque des microdoses plus élevées sont utilisées (> 2 g) ? Il est conseillé d'utiliser le DAP au lieu de NPK car le prix du kg de P est plus faible que dans les engrais NPK (Bielder et Gerard, 2015). Cependant, lorsque les semences et les engrais sont mélangés, il est recommandé d'utiliser l'engrais NPK parce que l'effet brûlant de cet engrais est plus faible (Aune *et al.*, 2007).

Semis mécanisés, épandage d'engrais et désherbage

Les semis manuels et mécanisés sont pratiqués dans la zone sahélo-soudanienne. Il existe des semoirs à traction animale, mais des semoirs motorisés simples ont également été développés par l'Institut d'Économie Rurale (IER) au Mali. Au Mali, le prix d'un semoir à traction animale et d'un semoir motorisé sont respectivement 110 et 800 euros. Pour les semis manuels, les paysans sèment généralement en prenant une pincée en utilisant le pouce et l'index. Il a été montré que le nombre de graines pour le sorgho et le mil était respectivement de 11 et 35 graines (Coulibaly, 2009). Le semis manuel donne aussi une grande variabilité du nombre de graines appliquées. Les semoirs peuvent fournir une densité, une profondeur de semis et un nombre de graines par poquet plus uniformes. Avec une densité de semis de 25 000 poquets à l'hectare, l'économie de

main-d'œuvre par la mécanisation par rapport au semis manuel est d'environ 80% (Coulibaly *et al.*, 2010). Le semoir permet de semer à une période plus optimale. La taille moyenne d'une exploitation au Mali est d'environ 4 hectares et le semis manuel prendra 48 heures si la densité de semis est de 25 000 poquets par hectare. Les semis sont donc souvent retardés si les semis mécanisés ne sont pas disponibles.

La mécanisation facilite également l'application des engrais. Si les doses d'engrais de l'ordre de 0,3 g par poquet sont utilisées, il est possible de mélanger les semences et les engrais dans la trémie du semoir, permettant ainsi l'application simultanée des graines et de l'engrais. Cela ne nuit pas à la semence tant que la dose d'engrais est faible. Des doses plus élevées d'engrais peuvent également être appliquées par l'utilisation du semoir, mais dans ce cas, les applications d'engrais doivent être entreprises dans une opération séparée. Un autre avantage du semis mécanisé est que les agriculteurs évitent le contact direct avec les pesticides lors du semis des semences traitées (Photo 3).



Photo 3 : Opérations de semis manuel, mécanique et motorisé en milieu paysan, région de Koulikoro

Le semoir en usage au Mali peut également être utilisé pour le désherbage en montant les dents de sarclage sur celui-ci. Traditionnellement, les mauvaises herbes sont enlevées manuellement, mais c'est une opération laborieuse et le sarclage est souvent fait trop tard. Même si le sarclage mécanique est pratiqué, un sarclage manuel complémentaire est nécessaire entre les poquets (Photo 4).



Photo 4 : Renforcement des capacités des producteurs : (a) trempage, (b) semoir motorisé et (c) sarclage motorisé, 2015

Les mauvaises herbes parasitiques comme le striga sont des facteurs importants de réduction du rendement dans l'agriculture en zone sahélo-soudanienne. Cette réduction est particulièrement associée à la faible fertilité du sol. On a trouvé des microdoses qui réduisent le problème de l'infestation par le striga, car il semble que la culture croît plus vite si le microdosage est pratiqué (Aune *et al.*, 2007).

Travail du sol et méthodes de captage de l'eau

Le labour du sol tout comme le buttage ont été créés pour augmenter le rendement par la création d'un lit de semis rugueux qui peut protéger les plantules, réduire la formation de croûtes et promouvoir le développement racinaire (Klaij et Hoogmoed, 1993). L'avantage du travail du sol est généralement plus élevé dans les sols lourds (Pingali *et al.*, 1987). Les sols sablonneux de la zone sahélo-soudanienne ne sont souvent pas labourés avant le semis.

Le captage de l'eau est particulièrement important sur les sols avec des coefficients de ruissellement élevés qui s'encroûtent facilement. Le zaï est une forme de cuvette de semis qui est faite en creusant une fosse d'un diamètre de 20 à 40 cm et de 10 à 20 cm de profondeur (Roose *et al.*, 1999). Le fumier et le compost sont souvent ajoutés au zaï. Le zaï crée un microenvironnement avec une plus grande disponibilité en eau et en nutriments. Le zaï a été développé à l'origine dans la région du Yatenga au Burkina Faso, mais a été introduit plus tard au Mali et au Niger. Sur un alfisol dégradé dans la région de Yatenga au Burkina Faso, on a montré que le témoin absolu (culture sans zaï), le zaï, le zaï + 3 tonnes de fumier/ha et le zaï + NPK (10 kg et 20 kg/ha) ont donné une augmentation de rendement sur deux ans de 43, 90, 474 et 619 kg/ha respectivement (Roose *et al.*, 1999). Ceci illustre le fait qu'il ne suffit pas de creuser les zaïs, mais l'application de nutriments végétaux à partir de compost ou d'engrais minéral est nécessaire. Les résultats du Niger (Fadondji *et al.*, 2006) et une autre étude au Burkina Faso (Sawadogo *et al.*, 2008) confirment l'importance d'ajouter des nutriments végétaux au zaï. Une application d'engrais a augmenté le rendement même en année sèche, probablement à cause de la stimulation de croissance des racines, effets des nutriments. Creuser les zaïs est un processus exigeant de la main-d'œuvre (300 heures/ha) (Roose *et al.*, 1999) et ce facteur, en plus de la disponibilité limitée de fumier, est une contrainte à son adoption (Wildemeersch *et al.*, 2013). Le type de sol peut aussi influencer le temps et la pénibilité pour creuser les zaïs.

D'autres techniques de captage d'eau comme les cordons pierreux et les billons cloisonnés peuvent être employées pour réduire le ruissellement et pour concentrer l'eau à proximité du plant. C'est surtout sur un sol lourd que les billons cloisonnés peuvent être bénéfiques (Kouyaté *et al.*, 2000).

Intrants organiques en Agriculture de Précision

Un facteur clé pour la durabilité de l'agriculture en zone sahélo-soudanienne est de restaurer autant que possible la matière organique du sol afin de maintenir et d'améliorer ses propriétés chimiques, physiques et biologiques (Buerkert *et al.*, 2000). L'apport important de carbone dans les sols des terres arides peut se faire sous forme de fumier de ferme (ordures ménagères des exploitations), de compost, de résidus des récoltes et de paillis provenant d'arbres ou de racines en décomposition de la culture précédente. Il semble que, sous le système actuel de pâturage libre, la plus grande partie de l'apport en carbone au sol doit provenir du fumier de ferme/compost en plus des racines de la culture précédente. L'utilisation du fumier comme principal apport de carbone est également plus compatible avec la mécanisation de l'agriculture. Les semoirs qui sont utilisés actuellement au Mali ne peuvent pas semer sur un paillis profond. L'utilisation des résidus de culture comme amendement du sol a de nombreuses vertus, mais leur valeur élevée en tant que fourrage dans les conditions sahéliennes les rend moins attrayants pour les agriculteurs à cet effet. La valeur des résidus de culture dépend du prix du lait et de la viande, de l'importance du fumier de ferme, du rôle des résidus de récolte dans l'alimentation des animaux de trait et de son importance pour assurer la survie des animaux (Turmel *et al.*, 2015).

Le fumier est une ressource dont l'approvisionnement est limité et sa qualité est fortement variable (Harris 1999). Les doses recommandées sont de l'ordre de 3 à 5 tonnes/ha (Harris, 1999) et l'effet de son application peut durer plusieurs années (Schlect et Hiernaux, 2004; Bielder et Gerard, 2015). Le fumier peut être apporté par application directe à partir des déjections du bétail ou appliqué en utilisant le fumier disponible dans l'enclos. La gestion améliorée du fumier peut être le résultat d'un processus d'intensification qui se déroule avec l'augmentation de la densité de population et de la réduction des pâturages (Harris, 1999). Une question importante dans l'Agriculture de Précision est de savoir comment augmenter la quantité et la qualité du fumier et d'appliquer le fumier de la manière la plus efficace. Plus de fumier peut être mis à disposition grâce à une meilleure intégration de la production de cultures et de bétail, à une meilleure production de fourrage et à une méthode de collecte améliorée de fumier (Harris, 1999). Des systèmes d'élevage plus intensifs sont toutefois plus exigeants en raison de la nécessité de récolter et de transporter les fourrages et de l'abreuvement des animaux. La qualité du fumier peut être augmentée en améliorant la qualité du fourrage et en utilisant de la litière sous les animaux pour recueillir plus d'urine et en protégeant l'enclos du vent et des pluies (Nzuma et Murwira, 2000). En utilisant la paille comme litière dans l'enclos, on a constaté que les pertes d'ammonium étaient réduites de 80 %. Si les animaux doivent paître les résidus des cultures dans le

champ, cela devrait se faire de préférence juste avant les semis afin de réduire la perte d'azote.

Puisque le fumier est une ressource très précieuse et une ressource en quantité limitée, il est avantageux d'appliquer le fumier en microdoses (Photo 5). Lors de l'essai des doses de 1 000, 2 000 et 3 000 kg/ha de fumier épandus uniformément ou en microdosage, il a été constaté que le placement dans un poquet du fumier donnait 88 kg/ha de plus de rendement que l'épandage à la volée du fumier (Ibrahim *et al.*, 2015). On a montré que le fumier placé dans le poquet stimulait davantage le développement racinaire que l'épandage à la volée du fumier. Le meilleur traitement a été 2000 kg de fumier/ha à raison de 200 g placés par poquet en combinaison avec 20 kg/hectare de DAP placés en microdoses par poquet. Le placement du fumier par poquet est une pratique locale au Mali qui a été observée par les auteurs de ce document.



Photo 5 : Fumures organique et minérale apportées en microdoses, Sotuba, 2014

Même s'il semble difficile de pratiquer le paillis à grande échelle avec des résidus de cultures dans les conditions actuelles en zone sahélo-soudanienne, il est toujours important de promouvoir son utilisation car il est bien documenté que l'utilisation de résidus des cultures comme paillis peut contribuer à améliorer, produire et reconstituer la qualité du sol (Buerkert *et al.*, 2000). L'utilisation des résidus de récoltes comme paillis (2 tonnes/ha) a augmenté les rendements de plus de 60 % (Rebafka *et al.*, 1994) et l'emploi d'engrais minéraux combinés au paillis peut contribuer à la reconstitution de la matière organique du sol et à l'augmentation des rendements. L'utilisation des résidus des cultures comme paillis peut devenir plus réaliste si le rendement augmente (Valbuena *et al.*, 2016; Bationo *et al.*, 1991), si des ressources fourragères alternatives sont développées ou si la traction motorisée remplace la traction animale (Baudron *et al.*, 2015). L'Agriculture de Précision, y compris la mécanisation motorisée, fait donc de l'usage de paillis une alternative plus faisable.

Les cultures dans la zone sahélo-soudanienne sont typiquement réalisées dans un parc caractérisé par des arbres épars. Ces arbres produisent de multiples avantages économiques et écologiques. Les arbres économiquement importants comprennent

Adansonia digitata, *Faidherbia albida*, *Vitellaria paradoxa* et *Parkia biglobosa* entre autres (Bayala *et al.*, 2015). Un effet bien établi est celui de *Faidherbia albida* sur les cultures comme le mil. Sur le mil au Niger, on a trouvé que le rendement sous la canopée de l'arbre est de 36% supérieur à celui de l'extérieur de la canopée (Kho *et al.*, 2001). Cet arbre a une phénologie inverse: il laisse tomber ses feuilles au début de la saison des pluies, limitant ainsi l'effet d'ombrage de l'arbre sur les cultures.

Au cours des dix dernières années, il a été de plus en plus intéressant d'utiliser les arbustes indigènes *Guiera senegalensis* et *Piliostigma reticulatum* pour le paillis. Ces arbustes ont des racines profondes limitant la compétition pour l'eau entre l'arbuste et la culture associée. Ces arbres ont des feuilles peu consommées par les animaux, ce qui empêche que ceux-ci soient broutés excessivement. Les arbres peuvent être taillés au début de la saison des pluies, les tiges et les brindilles sont laissées sur le sol. Après un certain temps, les fermiers peuvent collecter les tiges et les utiliser comme bois de chauffe. Au Sénégal, on a constaté que le paillis des parcelles avec *Guiera senegalensis* augmentait les rendements de mil de 212 kg/ha (Dossa *et al.*, 2012) par rapport aux parcelles sans arbres et sans paillis. La réponse à l'engrais augmentait aussi lorsque l'arbre était présent. La contrainte avec ce système est sa demande en main-d'œuvre et sa non compatibilité avec les opérations agricoles mécanisées. C'est particulièrement le cas des systèmes à base d'arbustes qui ont une densité plus élevée qu'un système parc à *Faidherbia albida*.

Gestion du temps et des ressources agricoles

Les agriculteurs prennent des décisions sur la gestion des ressources agricoles en tenant compte de la variabilité des conditions du sol et de la capacité des différentes cultures à s'adapter aux différentes conditions du sol. Les agriculteurs doivent en outre faire face à une forte variabilité des conditions climatiques entre les années d'adaptation des exploitations agricoles. Des résultats de la recherche qui peuvent aider les agriculteurs à gérer de manière différenciée les ressources agricoles dans l'espace et dans le temps commencent maintenant à apparaître dans les zones arides de l'Afrique de l'Ouest. Cette gestion peut inclure des décisions concernant l'ordre dans lequel les cultures sont semées, le moment opportun de semer, dans quel champ et sur quelles cultures appliquer l'engrais et la séquence des cultures en rotation. Cette gestion différenciée est particulièrement importante dans les terres arides parce que les ressources sont très rares et que les agriculteurs ne peuvent pas se permettre de les gaspiller.

L'un des principaux problèmes de localisation des ressources est l'ordre dans lequel les cultures sont semées car les temps optimum de semis des cultures dans la zone sahélo-

soudanienne diffèrent. Lors de l'essai de trois dates de semis différentes dans le Sud du Mali, on a constaté que les rendements du maïs et du sorgho sont réduits lorsque le semis est retardé à juillet alors que pour le mil on obtient l'effet inverse (Traoré *et al.*, 2014). Les rendements moyens de sorgho pour les deux premiers semis étaient de 88 % plus élevés que pour les semis tardifs. Il semble donc que le rendement du sorgho et du maïs soit plus sensible aux semis tardifs que le mil et que les paysans doivent donc semer ces cultures en premier. Le rendement de la paille est toutefois plus élevé pour toutes ces cultures pour une date de semis précoce.

Les agriculteurs n'ont pas les ressources financières nécessaires pour appliquer de l'engrais sur toutes leurs cultures. Le sorgho et l'arachide semblent valoriser les microdoses plus que le mil et le niébé comme il a été trouvé dans l'État du Kordofan-Nord du Soudan. Les RVC les plus élevés obtenus pour le sorgho, l'arachide, le mil et le niébé étaient de 11,9, 9,1, 6,6 et 1,8 respectivement (Aune et Ousman, 2011 ; Ousman et Aune, 2011). Au Mali, on a aussi constaté que le sorgho donnait plus de rendement avec le microdosage que le mil (Aune *et al.*, 2007).

Une autre question importante de la répartition des ressources est de savoir sur quel type de sol appliquer l'engrais. Les résultats du Niger indiquent que si les agriculteurs n'ont pas les ressources suffisantes pour appliquer l'engrais sur tous les champs, il est préférable d'appliquer l'engrais minéral dans les champs à forte productivité (souvent des champs proches des cases) par rapport aux champs à faible productivité (Fofana *et al.*, 2008 ; Lamers *et al.*, 1998). Le risque que le microdosage puisse causer l'extraction d'éléments nutritifs sera également moindre si le microdosage est appliqué à ces champs de case parce que les producteurs appliquent la plupart du fumier de ferme sur de tels champs. La récupération de l'engrais P a été presque deux fois plus élevée dans les champs autour des cases que dans les champs éloignés. Des études menées au Niger et au Burkina Faso sur le microdosage ont également montré que le risque de perte du microdosage diminuait à mesure que le rendement moyen du site augmentait (Buerkert *et al.*, 2001). Bielder et Gerard (2015) ont constaté d'un autre côté que l'augmentation du rendement grain était plus élevée dans les parcelles où le rendement du témoin était inférieur à 400 kg/ha par rapport aux parcelles où les rendements témoins étaient supérieurs à 400 kg/ha. Les parcelles du témoin à rendement élevé dans cette étude étaient surtout des parcelles avec du fumier, ce qui pourrait expliquer la faible réponse au microdosage. Les parcelles de fumier peuvent recevoir dans l'ordre de 10 tonnes de fumier/ha, ce qui est bien au-dessus des exigences pour l'approvisionnement en nutriments des plantes (Bielder et Gerard, 2001). On peut en conclure que le résultat ou l'effet du microdosage est le plus élevé sur les sites ayant une fertilité relativement

bonne telle que les champs loin des exploitations, mais les domaines qui sont bien fournis en fumier n'ont pas besoin d'une application de microdoses.

Au Niger, les agriculteurs ont utilisé une gestion différenciée du fumier de ferme (Schlecht et Burkert, 2004). Les agriculteurs appliquent généralement ces amendements au sol de faible fertilité et au sol des plateaux.

Il semble également y avoir une possibilité d'utiliser des positions spéciales dans une rotation des cultures pour augmenter le rendement. Dans la zone de production cotonnière au Sud du Mali, il a été démontré que la rotation du maïs et du niébé de façon additive s'améliorait après le maïs ou le coton qui sont les cultures bien fertilisés (Falconnier *et al.*, 2016). De cette façon, dans la rotation du maïs et du niébé associé, il n'y a pas eu de réduction de rendement du maïs alors que le niébé a fourni un avantage supplémentaire au sol par rapport à la culture de celui-ci. Cette étude a également montré que le niébé fourrager est beaucoup plus productif sur le sol lourd que sur un sol gravillonnaire.

L'utilisation des prévisions météorologiques est un élément important de l'Agriculture de Précision dans le secteur agricole commercial. En utilisant les prévisions météorologiques, les agriculteurs peuvent ajuster le temps des exploitations agricoles, le type de culture et la variété à cultiver, la densité de semis, les doses d'engrais organique et minéral, décider des mesures de protection des cultures, sur le contrat foncier et décider du moment de vendre les récoltes (Hansen, 2005) (Photo 6).



Photo 6 : Utilisation du téléphone portable par de jeunes agriculteurs pour s'informer des données météorologiques, pour la planification des travaux agricoles

Des prévisions météorologiques saisonnières sont disponibles pour l'Afrique de l'Ouest à travers les forums de PRESAO (Prévisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest). Cette prévision donne une estimation de la probabilité pour les précipitations cumulatives dans la prochaine saison. Cette estimation indique si la précipitation va être en dessous, proche ou au-dessus de la normale à long terme. Les prévisions météorologiques décennales sont fournies par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). Les prévisions météorologiques peuvent être fournies aux agriculteurs par la radio, par SMS et par des agents de vulgarisation. Un exercice

participatif avec des agriculteurs sénégalais au moyen d'un exercice de simulation avec des prévisions décennales et saisonnières a montré que les prévisions décennales étaient les plus utiles pour les agriculteurs (Roudier *et al.*, 2014). L'utilisation des prévisions a permis une augmentation de rendement dans 1/3 des cas, alors que seulement quelques cas de pertes ont été observés lorsque les agriculteurs ont ajusté leurs activités agricoles en fonction des prévisions météorologiques. Les agriculteurs ont ajusté leurs pratiques agricoles lorsqu'ils ont reçu les prévisions météorologiques en changeant la date de semis, la variété et par l'utilisation du fumier et de l'engrais minéral. L'utilisation des prévisions météorologiques pour décider de l'exploitation agricole devrait croître dans les conditions arides.

Durabilité de l'Agriculture de Précision

Les technologies proposées dans le cadre de l'Agriculture de Précision dans cet article comme le trempage des semences, le traitement des semences, le microdosage, le compost ou la fumure organique et le captage de l'eau sont des techniques rentables pour augmenter les rendements dans les conditions de la zone sahélo-soudanienne. Ces techniques augmentent les rendements en assurant un établissement des cultures plus uniforme et en favorisant le développement racinaire. Lors de l'évaluation de la durabilité de ces techniques, il est apparu l'importance de tenir compte de leurs dimensions environnementales, économiques et sociales. Le microdosage a été mis en doute avec comme motif qu'il peut mener à l'extraction d'éléments nutritifs (Camara *et al.*, 2013). Toutefois, la durabilité d'une technologie ne peut se fonder uniquement sur le bilan des éléments nutritifs, mais il faut tenir compte surtout de l'effet global de la technologie dans le système agricole. Le microdosage peut être considéré comme un point d'entrée dans l'intensification agricole. Pour les agriculteurs, il est plus judicieux d'utiliser les doses d'engrais avec le meilleur retour à l'investissement. Le microdosage avec 0,3 g par poquet est nettement supérieur à l'application de 6 g d'engrais par poquet (Aune *et al.*, 2007). Toutefois, au fil du temps, il est probable que des doses d'engrais supérieures à 0,3 g par poquet soient nécessaires.

Lorsque les agriculteurs d'autres parties du monde ont commencé à utiliser des engrais, ils n'ont pas débuté avec une dose d'application équilibrée, mais ont plutôt utilisé des doses d'engrais qui étaient abordables et rentables. Un récent rapport d'évaluation de l'introduction du microdosage et du trempage des semences au Mali a montré que le rendement a augmenté entre 50 et 100% dans les champs paysans (Djiga, 2015). Les agriculteurs pratiquant ces technologies ont créé un excédent qui leur a permis d'acheter plus d'animaux et des charrettes. Ceci augmente à son tour la disponibilité de fumier et facilite ses transports. La sécurité alimentaire s'est améliorée et une

spirale de développement positive a été créée, caractérisée par une production accrue, un renforcement de la production agricole et enfin une augmentation de la sécurité alimentaire. Nous prétendons que la durabilité à long terme d'une pratique est plus associée à sa capacité de créer un excédent même si son effet isolé est un équilibre nutritionnel négatif.

L'intégration des légumineuses à graines dans le système de culture, soit en tant que culture associée, soit en rotation, a été préconisée pendant des décennies comme une méthode pour augmenter le revenu des agriculteurs, fournir du fourrage et la fixation de l'azote. Toutefois, les agriculteurs continuent d'utiliser le système traditionnel avec une faible densité de plants pour les légumineuses à graines (Schlecht *et al.*, 2006). L'un des problèmes liés à la culture des légumineuses à graines est la forte demande de main-d'œuvre associée à leur culture. La distance entre les lignes pour l'arachide est de 40 cm et cela signifie qu'il y a 25 km de lignes d'arachide par hectare. Le semis manuel de l'arachide est un travail très exigeant et le semis est pour cette raison souvent retardé. Il est donc probable que la mécanisation rendra plus intéressant pour les agriculteurs le fait d'étendre la culture de l'arachide et d'autres légumineuses à grains et contribuer ainsi à un équilibre nutritionnel plus positif.

Conclusion

Il est préconisé une forme d'Agriculture de Précision qui se concentre sur le traitement des semences afin de permettre l'établissement sûr et rapide des cultures et de créer un microenvironnement avec des conditions de croissance favorables à proximité des graines semées. Cela peut être obtenu par la sélection de grosses graines, l'utilisation de semences trempées, le traitement des semences à l'insecticide/fongicide et l'application de microdoses d'engrais minéral et de fumier. Ces méthodes devraient en outre être combinées avec la mécanisation du semis et du sarclage afin de réaliser des opérations agricoles plus rapidement et un espacement plus correct des plantes, une profondeur appropriée de semis et un nombre uniforme de graines par poquet. En combinant ces techniques pour l'intensification biologique/chimique avec la mécanisation, une double intensification sera obtenue, caractérisée par une plus grande productivité des terres et du travail. Les agriculteurs devraient en outre différencier la gestion des ressources agricoles en tenant compte de la variabilité du sol et de la capacité des différentes cultures de faire une utilisation efficace des conditions de sol améliorées. Parmi les exemples de cette gestion différenciée, mentionnons l'ordre dans lequel les cultures sont semées et sur quel type de champs (de cases ou champs éloignés) appliquer les microdoses si l'engrais est en quantité limitée et la position des différentes cultures

dans une rotation. En prenant ces facteurs en considération, il est possible d'accroître l'efficacité de l'utilisation des ressources et une plus grande rentabilité.

Ces technologies et ces approches peuvent être considérées comme un paquet de départ pour l'intensification agricole. Différentes technologies peuvent être ajoutées à ce paquet de départ comme la rotation des cultures avec des légumineuses à graines, l'épandage de l'urée au tallage, l'épandage de fumier complémentaire, le paillis et l'agroforesterie selon les possibilités et les ressources de l'agriculteur. La recherche agricole en Afrique s'est depuis longtemps concentrée sur les technologies d'amélioration du rendement. Nous pensons que le temps est venu d'envisager également l'utilisation des technologies utilisant moins de main-d'œuvre. L'agriculture est souvent associée à la corvée et l'accent mis sur l'amélioration des technologies utilisant moins de main-d'œuvre en combinaison avec les technologies d'amélioration du rendement augmentera vraisemblablement l'attractivité de l'agriculture, ce qui contribuera à rendre les jeunes plus intéressés par l'investissement dans le développement agricole.

Références

- Aune J.B., Doumbia M., Berthé A., 2007. Microfertilizing sorghum and pearl millet in Mali. Agronomic, economic and social feasibility. *Outlook Agr* 36: 199-203.
- Aune J.B., Bationo A., 2008. Agricultural intensification in the Sahel-the ladder approach. *Agr Syst* 98:119-125.
- Aune J.B., Ousman A., 2011. Effect of seed priming and micro-dosing of fertilizers on sorghum and pearl millet in Western Sudan. *Experimental Agriculture* 47 (3): 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(2): 103-108.
- Bayala J., Sanou J., Teklhaimanot Z., Ouedraogo S.J., Kalinganire A., Coe R., van Noordwijk M., 2015. Advances in knowledge of processes in soil-tree-crop interaction in parkland systems in the West African Sahel: A review. *Agr Ecosyst Environ* 205: 25-35.
- Bielders C.L., Gerard B., 2015. Millet response to microdosing fertilization in south-western Niger: Effect of antecedent fertility management and environmental factors. *Field Crop Res* 171:165-175.
- Buerkert A., Bationo A., Dossa K., 2000. Mechanisms of residue mulch-induced cereal growth increases in West Africa. *Soil Sci Soc Am J* 64: 346-358.
- Buerkert A., Bationo A., Piepho H.P., 2001. Efficient phosphorus application strategies for increase crop production in sub-Saharan West Africa. *Field Crop Res* 72:1-15.

- Camara B.S., Camara F., Berthé A., Oswald A., 2013. Micro-dosing of fertilizer - a technology for farmers' needs and resources. *Int. J. Agri Science* 3: 387-399.
- Coulibaly A., Aune J.B., Sissoko P., 2010. Etablissement des cultures vivrières dans les zones sahélienne et soudano-sahélienne du Mali. Dryland Coordination Group Report n°. 60, 51p. http://drylands-group.org/assets/documents/Publications/1045-gcoza_rapport_no._60.pdf. Accessed 13 May 2016.
- Djiga A., 2015. Evaluation d'impact du projet d'établissement des cultures vivrières dans les zones sahéliennes et soudano-sahéliennes du Mali. Dryland Coordination Group, Oslo. <http://drylands-group.org/assets/documents/Impact-Evaluation-Mali-FINAL.pdf>. Accessed 13 May 2016.
- Dossa E.L., Diedhiou I., Khouma M., Sene M., Lufafa A., Kizito F., Samba S.A.N., Badiane A.N., Diedhiou S., Dick R.P., 2012. Crop Productivity and Nutrient Dynamics in a Shrub (*Guiera senegalensis*)–Based Farming System of the Sahel. *Agron J* 104:1255-1264.
- DNSI, 1994. Enquête malienne de conjoncture économique et sociale. MLI-DNSI-EMCES-1994- v01.
- Falconnier G., Descheemaeker K., van Mourik T., Giller K., 2016. Unravelling the causes of variability in crop yields and treatment responses for better tailoring of options for sustainable intensification in southern Mali. *Field Crop Res* 187:113-126.
- FAO, 2006. Sahel weather and crop situation report. Report 3-08 August 2006. <http://www.fao.org/docrep/009/j8124e/j8124e00.htm> Accessed 13 May 2016.
- Fofana B., Wopereis M.C.S., Bationo A., Breman H., Mando A., 2008. Millet nutrient use efficiency as affected by natural soil fertility, mineral fertilizer use, and rainfall in the West African Sahel. *Nutr Cycl Agroecosyst* 81: 25-36.
- Fatondji D., Martius C., Biielders C.L., Vlek P.L.G., Bationo A., Gerard B., 2006. Effects of planting technique on pearl millet yield, nutrient uptake, and water use on degraded land in Niger. *Nutr Cycl Agroecosyst* 76: 203-217.
- Hansen J.W., 2005. Integrating seasonal climate prediction and agricultural models for insights into agricultural practice. *Phil. Trans. R. Soc. B* 360: 2037-2047.
- Harris D., 2006. Development and testing of “on-farm” seed priming. *Adv in Agron* 90:129-178.
- Ibrahim A., Abaidoo R.C., Fatondji D., Opoku A., 2015. Hill placement of manure and fertilizer micro-dosing improves yield and water use efficiency in the Sahelian low input millet-based cropping system. *Field Crop Res* 180:29-36.
- ICRISAT, 2009. Fertilizer microdosing. Boosting production in unproductive lands. <http://www.icrisat.org/impacts/impact-stories/icrisat-is-fertilizer-microdosing.pdf>. Accessed 13 May 2016.

- Kho R.M., Yacouba B., Yayé M., Katkoré B., Moussa A., Iktam A., Mayaki A., 2001. Separating the effects of trees on crops: the case of *Faidherbia albida* and millet in Niger. *Agroforest Syst* 52:219-238.
- Klaj M.C., Hoogmoed W.B., 1993. Soil management for crop production in African Sahel. II. Emergence, establishment and yield of pearl millet. *Soil Till Res* 25:301-355.
- 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 Nov., 1982.
- Kouyate Z., Franzluebbbers K., Juo A.S.R., Hossner L.R., 2000. Tillage, crop residue, legume rotation, and green manure effects on sorghum and millet yields in the semi-arid tropics of Mali. *Plant Soil* 225:141-151.
- Lamers J.M., Bruentrup N., Buerkert A., 1998. The profitability of traditional and innovative mulching techniques using millet crop residues in the West African Sahel. *Agr Ecosyst Environ* 67: 23-35.
- Mortlock M.Y., Vanderlip R.L., 1989. Germination and establishment of pearl millet and sorghum of different seed qualities under high temperature environments. *Field Crop Res* 22: 195- 209.
- Memento de l'agronome, 2009. CIRAD-GRET, Ministère des Affaires Etrangères, France, 1691 p.
- Norton R.D., 2003. *Agricultural Development Policy: Concepts and Experiences*. Willey, 540 p.
- Nzuma J.K., Murwira H.K., 2000. Improving the management of manure in Zimbabwe. *Managing Africa's Soils*, No. 15. London: International Institute for Environment and Development. <http://pubs.iied.org/pdfs/X169IIED.pdf>. Accessed 13 May 2016.
- Ousman A., Aune J.B., 2011. Effect of seed priming and micro-dosing of fertilizer on groundnut, sesame and cowpea in Western Sudan. *Exp Agr* 47:431-443.
- Pingali, P., Bigot, Y., Binswanger H.P., 1987. *Agricultural mechanization and the evaluation of farming systems in sub-Saharan Africa*. The John Hopkins University Press, 216 p.
- Rebafka F.P., Hebel A., Bationo A., Stahr K., Marschner H., 1994. Short-term and long-term effects of crop residues and of phosphorus fertilization on pearl-millet yield and on an acid soil in Niger, West Africa. *Field Crop Res* 36: 113-124
- Roudier P., Muller B., Aquino P., Roncoli C., Soumaré M.A., Batté L, Sultan B., 2014. The role of climate forecasts in smallholder agriculture: Lessons from participatory research in two communities in Senegal. *Climate Risk Manag* 2: 42–55.

- Roose E., Kaboré V., Guenat C., 2008. Zaï Practice: A West African traditional rehabilitation system for semiarid degraded lands, a case study in Burkina Faso. *Arid Soil Res Rehab* 13:343-355.
- Sawadogo H., Bock L., Lacroix D., Zombré N.P., 2008. Restauration des potentialités de sols dégradés à l'aide du zaï et du compost dans le Yatenga (Burkina Faso). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2008 12: 279-290.
- Schlecht E., Buerkert A., 2004. Organic input and farmers' management strategies in millet fields of western Niger. *Geoderma* 121: 271-289.
- Schlecht E., Hiernaux P., 2004. Beyond adding up input and output: process assessment and upscaling in nutrient modeling flows. *Nutr Cycl Agroecosys* 70:303-319.
- Schlecht E., Buerkert A., Tielkes E., Bationo A., 2006. A critical analysis of challenges and opportunities for soil fertility restoration in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutr Cycl Agroecosys* 76: 109-136.
- Tabo R., Bationo A., Maimouna K.D., Hassan O., Koala S., 2006. Fertilizer micro-dosing for the prosperity of small-holders farmers in the Sahel: Final report. Global Theme on Agroecosystems Report No. 23. PO. Box 12404, ICRISAT, Niamey, 28 pp.
<http://ejournal.icrisat.org/mpii/v3i1/pdfs/24-2006.pdf>. Accessed 13 May 2016.
- Tiwari A., Jaga P.K., 2012. Precision farming in India – a review. *Outlook Agr* 41:139-143.
- Traoré B., van Wijk M.T., Descheemaeker K., Corbels M., Rufino M.C., Giller K., 2014. Evaluation of climate adaption options for Sudano-Sahelian cropping systems. *Field Crop Res* 156: 63-75.
- Turmel M.S., Speratti A., Baudron F., Verhulst N., Govaerts B., 2015. Crop residue management and soil health: A systems analysis. *Agr Syst* 134:6-16.
- Valbuena D., Tui S.H.K., Erenstein O., Teufel N., Duncan A., Abdoulaye T., Swain B., Mekonnen K., Germaine I., Gerard B., 2015. Identifying determinants, pressures and trade-offs of crop residue use in mixed smallholder farms in Sub-Saharan Africa and South Asia. *Agr Syst* 134: 107-118.
- Wildemeersch J.C.J., Timmerman E., Mazijn B., Sabiou M., Ibro G., Garba M., Cornelis W., 2013. Assessing the Constraints to Adopt Water and Soil Conservation Techniques in Tillabéri, Niger. *Land Degrad Dev* 26: 491-501.



Ce(tte) œuvre est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.