

Détermination des formules d'engrais minéraux et des périodes de semis pour une meilleure production du maïs (*Zea mays* L.) au Sud et au Centre Bénin

I. Balogoun¹, A. Saïdou¹, L. E. Ahoton², A. Adjanohoun³, G. L. Amadji¹, G. Ezui⁴, S. Youl⁵, A. Mando⁴, A. M. Igué⁶ et B. A. Sinsin⁷

Résumé

Des formules d'engrais minéraux et des dates de semis simulées par le modèle DSSAT pour une meilleure productivité du maïs ont été validées en milieu paysan au sud et centre Bénin. A cet effet, deux différents essais ont été conduits dont un sur la détermination de la meilleure formule d'engrais pour l'amélioration de la productivité du maïs et le second sur la détermination d'une période propice pour le semis du maïs. Le dispositif expérimental pour chacun des deux essais au niveau de chaque site est un bloc aléatoire complet à quatre répétitions. A partir des formules d'engrais N-P-K (0-0-0 ; 44-15-17,5 ; 80-30-40 ; 80-15-40 ; 80-30-25 ; 80-30-0 ; 69-30-40 ; 92-30-40 ; 69-15-25 ; 46-15-25) testées, les doses optimales de N, P et K ont été déterminées sur la base des régressions quadratiques. Huit périodes de semis d'intervalle de dix jours environ entre deux semis dont la première date de semis a eu lieu en fin mars et la dernière fin juin au sud et respectivement mi-mai et début août au centre ont été observées. Les doses optimales de N, P et K pour la fertilisation du maïs au sud et centre du Bénin sont respectivement 80,5 kg N/ha, 22,5 kg P/ha et 20 kg K/ha. Cette formule optimale d'engrais permet d'obtenir des rendements grains et paille respectifs de 3,18 ± 0,29 et 4,55 ± 0,25 t MS/ha sur le site de Dogbo ; 2,25 ± 0,03 et 4,96 ± 0,68 t MS/ha sur le site d'Allada et 2,58 ± 0,21 et 5,20 ± 0,39 t MS/ha sur le site du centre. Les différentes périodes de semis ont une influence significative ($p < 0,05$) sur les rendements grains et paille. La meilleure période de semis du maïs est le mois d'Avril au sud et de Mai au centre Bénin. Ces résultats confirment les prédictions du modèle DSSAT. Les résultats de la présente étude montrent la nécessité d'actualiser les doses d'engrais et les périodes de semis pour la production du maïs au niveau de toutes les zones agro-écologiques du Bénin.

Mots clés : DSSAT, fertilité des sols, dose optimale, fertilisation du maïs, Bénin.

¹ MSc. Ir. Ibouaïman BALOGOUN, Laboratoire des Sciences du sol, Département de Production Végétale, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi ; 01 BP 526 Recette Principale, Cotonou 01 ; Tél. : (+229) 97 60 45 98 ; E-mail : iboubalogoun@gmail.com ; République du Bénin.

Dr Ir. Aliou SAÏDOU, Laboratoire des Sciences du sol, Département de Production Végétale, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi ; 01 BP 526 Recette Principale, Cotonou 01 ; Tél. : (+229) 97 49 44 80 ; E-mail : saidoualiou@gmail.com ; République du Bénin.

Prof. Dr Ir. Guillaume Lucien AMADJI, Laboratoire des Sciences du sol, Département de Production Végétale, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi ; 01 BP 526 Recette Principale, Cotonou 01 ; Tél. : (+229) 97 03 65 72 ; E-mail : gamadji@yahoo.fr ; République du Bénin.

² Dr Ir. Léonard Essèhou AHOTON, Laboratoire de Biologie Végétale, Département de Production Végétale, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi ; 01 BP 526 Recette Principale, Cotonou 01 ; Tél. : (+229) 90 91 45 42 ; E-mail : essehahoton@yahoo.fr ; République du Bénin.

³ Dr Ir. Adolphe ADJANOHOOUN, Centre de Recherches Agricoles Sud, Institut National des Recherches Agricoles du Bénin. BP 03 Attogon (Niaouli), Tél. : (+229) 90 02 98 16, E-mail : adjanohouna@yahoo.fr, République du Bénin

⁴ MSc. Ir. Guillaume EZUI, IFDC-Afrique Lomé, Programme Gestion des Ressources Naturelles, BP 4483 Lomé Togo ; Tél. : (+228)90097860 ; E-mail : gezui@ifdc.org ; République du Togo.

Dr Ir. Abdoulaye MANDO, IFDC-Afrique Lomé, Programme Gestion des Ressources Naturelles, BP 4483 Lomé Togo ; Tél. : (+228)22217308 ; E-mail : amando@ifdc.org ; République du Togo.

⁵ Dr Ir. Sansan YOUL, IFDC-Afrique, Antenne Ouagadougou, Burkina Faso, 11 BP 82 Ouagadougou 11 ; Tél. : (+226) 70 26 45 36 ; E-mail : syoul@ifdc.org ; République du Burkina Faso.

⁶ Prof. Dr Ir. Attanda Mouïnou IGUE, Laboratoire des Sciences du Sol, Eaux et Environnement de l'Institut National de Recherche Agronomique du Bénin (LSSEE/INRAB), 01 BP 988 Recette Principale, Cotonou 01 ; Tél. : (+229) 97 47 21 53 ; E-mail : igue_attanda@yahoo.fr ; République du Bénin.

⁷ Pr. Dr Ir. Brice Augustin SINSIN, Laboratoire d'Ecologie Appliquée, Département d'Aménagement et Gestion des Ressources Naturelles, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi ; 01 BP 526 Recette Principale, Cotonou 01 ; Tél. : (+229) 90026857 ; E-mail : bsinsin@gmail.com ; République du Bénin.

Determination of mineral fertilizers' doses and sowing periods for better maize (*Zea mays* L.) production in south and centre Benin

Abstract

Mineral fertilizer doses and sowing periods simulated by DSSAT for better maize productivity were validated through on-farm experiment in south and centre Benin. Two different experiments were carried out: the first on the determination of the better fertilizer dose to improve maize productivity and the second on the determination of the most suitable sowing period for maize production. The experimental design for both experiments a randomized complete block design with four replications for each experiment. Based on the N-P-K doses generated by DSSAT model (0-0-0 ; 44-15-17,5 ; 80-30-40 ; 80-15-40 ; 80-30-25 ; 80-30-0 ; 69-30-40 ; 92-30-40 ; 69-15-25 ; 46-15-25), the optimal doses of each of N, P and K nutrients were tested using quadratic regressions. Eight sowing periods with interval of approx. ten days between two consecutive sowing periods were tested. The first sowing date has been done in March and the last end of June in the south while in the centre, the first sowing date has been done in mid-May and the last beginning of August. The optimal doses of N, P and K for maize fertilization in the south and centre Benin are 80.5 kg N/ha, 22.5 kg P/ha and 20 kg K/ha, respectively. These fertilizer rates resulted in maize grain and straw yields of 3.18 ± 0.29 and 4.55 ± 0.25 t MS/ha on the site of Dogbo; 2.25 ± 0.03 and 4.96 ± 0.68 t MS/ha on the site of Allada; 2.58 ± 0.21 and 5.20 ± 0.39 t MS/ha on the site of centre. The different sowing periods had significant influence ($p < 0.05$) on maize grain and straw yields. The most suitable sowing period of maize is April in the south and May in the centre of Benin which confirms DSSAT's simulation. These results show the importance of the update of the mineral fertilizer doses and the sowing dates for each Benin agro-ecological zones.

Key words: DSSAT, soil fertility, optimum dose, maize fertilization, Benin.

INTRODUCTION

L'une des principales contraintes de l'agriculture en Afrique au sud du Sahara est la baisse constante du niveau de la fertilité des sols avec pour conséquence la baisse des niveaux de productivité des cultures (Saïdou *et al.*, 2012). Le Bénin ne fait pas exception à cette situation. Dans le pays, outre les aléas climatiques et les nuisibles, la faible productivité du maïs est due en grande partie à la baisse de la fertilité des sols et la mauvaise répartition des pluies (Balogoun, 2012). Or, le maïs produit actuellement dans tout le Bénin, fait l'objet de diverses transactions économiques et représente de ce fait une source de revenus non négligeable pour les producteurs et les commerçants.

La solution à la baisse de la capacité de production des terres passe nécessairement par des investissements dans la fertilité des terres (Kanté, 2001). La fumure minérale est une des solutions d'amélioration chimique des sols proposées pour la compensation des pertes en nutriment et des carences nutritionnelles observées au niveau des systèmes de production. Au Bénin, les doses de 150 kg/ha d'engrais coton NPKSB (14-23-14-5-1) et 50 kg/ha d'urée (soit NPK 44-15-17,5) recommandées par les services de vulgarisation sont relativement faibles et ne tiennent pas compte du niveau actuel de dégradation des sols et des exportations des cultures (Dugué, 2010). Cette formule d'engrais appliquée au niveau de toutes les zones agro-écologiques du Bénin ne tient pas également compte de la variabilité climatique laquelle peut considérablement affecter le niveau de lessivage des nutriments et des pertes occasionnées par l'érosion (Saïdou *et al.*, 2003). La culture du maïs étant exigeante en nutriments, elle nécessite alors la mise au point d'une formule adéquate d'engrais N-P-K pour une meilleure productivité de la culture.

C'est dans cette optique que Ezui *et al.* (2011) sur la base du modèle de simulation DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) ont proposé des formules d'engrais pour la culture du maïs pour le sud et le centre Bénin. Mais ces formules d'engrais méritent d'être validées en milieu paysan avant toute action de vulgarisation. Les résultats de simulation ont montré que l'azote et le phosphore constituent les éléments qui limitent le plus le niveau de rendement du maïs au sud et l'azote au centre Bénin. Ainsi, selon les résultats de la simulation, les doses de 80 N kg/ha et 30 kg P/ha constituent les niveaux optima de N et P. De plus, le niveau de K, à apporter au sol sous culture, varie entre 0 et 40 kg/ha en étant de moins en moins limitant du sud vers la région centrale du Bénin à cause de la nature de la roche mère (Ezui *et al.* 2011).

En plus de la contrainte de la baisse de la fertilité des sols, la variabilité et l'irrégularité du régime des pluies affectent également les niveaux de rendement des cultures (Oga, 2012). Cette situation amène les producteurs à varier les semis en fonction du régime des pluies. Toutefois, les semis après les toutes premières pluies connaissent des périodes de stress hydrique affectant considérablement le niveau de rendement du maïs. Cette pratique de semis échelonné dans le temps s'inscrit au titre des

stratégies de minimisation de risque qu'adoptent les producteurs. Pour une meilleure valorisation des formules d'engrais pour le maïs, la détermination d'une période propice de semis s'avère nécessaire.

La présente étude vise à : (1) valider les doses optimales de nutriments N, P et K pour la culture du maïs au sud et au centre Bénin simulées par le modèle DSSAT ; (2) évaluer les niveaux de rendements grains et paille de maïs en milieu paysan selon les doses optimales de N, P et K ; (3) enfin, déterminer la période propice pour le semis du maïs ainsi que le niveau de rendements grains et paille de maïs affecté selon les conditions paysannes.

MATERIEL ET METHODES

Milieu d'étude

La présente étude a été conduite dans les villages de Sékou et Attogon (commune d'Allada) et Dévé et Ayomi (commune de Dogbo) au sud et dans les villages de Gomé et Miniffi (respectivement communes de Glazoué et de Dassa-Zoumè) au Centre Bénin. Ces villages ont été identifiés avec l'appui des services de vulgarisation. La commune de Dogbo est située entre 6°47'56" de latitude Nord et 1°50'35" de longitude Est avec une altitude moyenne de 58 mètres. La commune d'Allada par contre, est située à 6°39'52" latitude Nord et à 2°0'9'30" longitude Est. La commune de Dassa est située entre 7°50,4' de latitude Nord et 2°10' de longitude Est, enfin la commune de Glazoué est située entre 7°90' et 8°30' de latitude Nord, 2°05' et 2°22' de longitude Est.

Le climat de la zone Sud Bénin est de type subéquatorial caractérisé par de faibles écarts de température, avec une moyenne annuelle de 28 °C. Le centre du Bénin par contre, est caractérisée par un climat soudano-guinéen à un régime pluviométrique annuel et de grandes variations de température avec une moyenne annuelle autour de 28 °C. Dans la zone d'étude, la moyenne annuelle de l'évapotranspiration potentielle est de 1.543 mm et la pluviométrie moyenne de 1.100 mm. Les sols ferrallitiques dominent dans les deux communes du Sud alors que dans les communes du Centre, ce sont les sols ferrugineux tropicaux qui dominent.

Conduite des essais

Deux essais agronomiques ont été installés en milieu paysan : un essai fertilisation pour la validation des formules d'engrais et un essai date de semis. La sélection des parcelles des essais fertilisations a été faite après une étude de l'histoire des parcelles. Un producteur a été sélectionné par village, soit quatre au sud et deux au centre Bénin. Le dispositif expérimental est un bloc aléatoire complet à quatre répétitions avec des parcelles élémentaires de 44,8 m² (8 m x 5,6 m) comportant dix traitements caractérisés par les différentes combinaisons d'engrais (Tableau 1). La dose vulgarisée (T1) représente 150 kg/ha de NPK 14-23-14 et 50 kg/ha d'urée (Dugué, 2010). Les doses simulées (T2 et T5) par contre représentent les niveaux optima de N, P et K simulés par le modèle DSSAT. Les doses optimales d'adaptabilité au N, P et K ont été déterminées en comparaison avec la dose vulgarisée.

Tableau 1. Caractéristiques des différentes combinaisons d'engrais apportées

Traitements		Doses de nutriments (kg/ha)			Quantités d'engrais pesées (kg) par parcelle élémentaire		
		N	P	K	Urée	TSP	KCI
T0	Témoin	0	0	0,0	0,000	0,000	0,000
T1	Vulgarisation nationale	44	15	17,5	0,428	0,332	0,157
T2	Dose simulée 1	80	30	40,0	0,779	0,664	0,360
T3	Dose d'adaptabilité au P	80	15	40,0	0,779	0,332	0,360
T4	Dose d'adaptabilité au K	80	30	25,0	0,779	0,664	0,225
T5	Dose simulée 2	80	30	0,0	0,779	0,664	0,000
T6	Dose 1 d'adaptabilité au N	69	30	40,0	0,672	0,664	0,360
T7	Dose 2 d'adaptabilité au N	92	30	40,0	0,896	0,664	0,360
T8	Dose 1 d'adaptabilité au N-P-K	69	15	25,0	0,672	0,332	0,225
T9	Dose 2 d'adaptabilité au N-P-K	46	15	25,0	0,448	0,332	0,225

Concernant l'essai date de semis, le dispositif a comporté huit traitements qui sont les différentes périodes de semis (Tableau 2). Compte tenu de la mauvaise répartition des pluies au sein des sites et entre les sites, les semis ont été effectués en fonction des périodes de pluies tout en respectant un écart minimum d'au moins 5 jours entre deux pluies.

Tableau 2. Différentes périodes de semis du maïs au cours de l'année 2011 en fonction des sites

Traitements	Commune d'Allada	Commune de Dogbo		Commune de Glazoué
	Village d'Atogon	Village d'Ayomi	Village de Dévé	Village de Gomé
S1	05 avril	28 mars	01 avril	17 mai
S2	18 avril	06 avril	18 avril	31 mai
S3	30 avril	03 mai	03 mai	10 juin
S4	13 mai	13 mai	13 mai	20 juin
S5	30 mai	26 mai	31 mai	30 juin
S6	09 juin	06 juin	13 juin	14 juillet
S7	19 juin	17 juin	24 juin	26 juillet
S8	29 juin	27 juin	06 juillet	03 août

Le mode de préparation du sol pour les deux types d'essai a été un labour à plat suivi d'un sarclage lors du deuxième sarclage. Le maïs variété EVDT 97 STRW de cycle de 90 jours a été semé. Les semis ont été faits sur les parcelles élémentaires à des écartements de 80 cm entre deux lignes et 40 cm entre plants (soit une densité de semis de 62.500 plants/ha avec deux plants par poquet). Deux sarclages ont été effectués, le premier entre le 11^{ème} et le 14^{ème} jour après semis (JAS) et le deuxième entre le 40^{ème} et le 44^{ème} JAS (avant l'application du deuxième apport d'urée). Le P et le K ont été apportés sous forme de fumure de fond lors du semis du maïs suivant les doses indiquées. Le P est apporté sous la forme de triple superphosphate 45% P₂O₅ et le K sous la forme de KCl 60% K₂O. L'essai période de semis a reçu une fumure suivant la dose recommandée par les services de vulgarisation, soit 44 kg N/ha, 15 kg P/ha et 17,5 kg K/ha (Adjanohoun *et al.*, 2011). L'urée pour les deux essais a été apportée sous forme de fumure de couverture avec enfouissement dans un poquet à environ 10 cm du collet du plant de maïs selon deux fractions identiques qui sont appliquées respectivement à 15 et 45 JAS. La récolte du maïs a été faite à la maturité physiologique suite à l'assèchement parfait des spaths des épis. Les plants et lignes de bordures ont été éliminés. Des échantillons d'épis et de paille ont été prélevés, envoyés au laboratoire où ils ont été séchés à 70 °C jusqu'à poids constant (après 72 h) à l'étuve afin de déterminer la matière sèche.

Des prélèvements d'échantillons de sol ont été faits à 0-20 cm ; 20-40 cm et à 40-60 cm de profondeur (Adjanohoun *et al.*, 2011). Les prélèvements ont consisté à la réalisation d'échantillons composites au niveau de chaque parcelle avant l'installation de l'essai juste après le labour et ceci avant l'apport de la fumure de fond. Les analyses chimiques ont été effectuées au Laboratoire des Sciences du Sol de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi. Ces analyses ont consisté en la détermination du pH (eau) (méthode potentiométrique dans un rapport sol/solution de 1/2,5), du carbone organique (méthode d'Anne), du phosphore assimilable (méthode de Bray 1), de l'azote total (méthode de Kjeldahl), des bases échangeables par la méthode de Metson à l'acétate d'ammonium à pH 7.

Concernant l'essai fertilisation, des analyses de régression des courbes de réponse ont été faites à l'aide du logiciel Statistical Analysis System (SAS) version 9.2 afin de déterminer les doses optimales de N, P et K. La procédure GLM a été utilisée pour les analyses statistiques de l'essai date de semis. Ces analyses ont essentiellement consisté en des analyses de variance. Les valeurs moyennes ont été ensuite comparées entre elles à l'aide du test de Student Newman Keuls au seuil de 5%.

RESULTATS

Caractéristiques chimiques des sols

Les propriétés chimiques du sol des sites avant l'installation des essais fertilisation (Tableau 3.1) ont montré d'une façon générale que les sols des sites de Dogbo et Allada au Sud-Bénin sont légèrement acides. Ces sols ont tous présenté un faible niveau de fertilité caractérisé par des rapports C/N élevés pour les couches arables (0-20 cm de profondeur). Par contre, au niveau du site du Centre-Bénin, le pH (eau) a été alcalin dans les deux premiers horizons et légèrement acide dans le dernier avec un niveau de fertilité moyen. Ces sols ont été plus riches en K⁺ échangeable comparativement à ceux d'Allada et de Dogbo. Toutefois, ces sols ont présenté un faible niveau de carbone organique, de Ca²⁺ et de Mg²⁺ échangeables comparativement aux sols des sites du Sud-Bénin. D'une manière générale, le phosphore assimilable a été plus faible à Dogbo comparativement aux sols des deux autres sites.

Tableau 3.1. Propriétés chimiques du sol avant l'installation des essais fertilisations

Sites	Villages	Profondeurs (cm)	pH(H ₂ O)	C-org (g/kg)	N-total (g/kg)	P-Bray 1 (mg/kg)	Bases échangeables (cmol/kg)		
							Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
Dogbo	Ayomi	0 – 20	5,73	24,20	0,78	32,38	5,02	3,39	1,08
		20 – 40	5,63	16,17	0,53	25,44	5,02	4,64	0,96
		40 – 60	5,81	13,51	0,53	21,59	4,45	4,56	0,71
	Dévé	0 – 20	5,50	8,79	0,42	25,83	4,45	3,31	0,85
		20 – 40	5,96	8,49	0,31	50,88	5,59	3,31	0,75
		40 – 60	5,54	8,20	0,28	53,96	4,45	3,72	0,61
Allada	Attogon	0 – 20	5,98	10,6	0,73	75,55	6,16	4,22	0,72
		20 – 40	5,92	9,1	0,42	36,23	6,16	3,81	0,60
		40 – 60	5,72	8,8	0,36	33,15	6,16	4,56	0,69
	Sékou	0 – 20	5,64	11,2	0,62	77,09	6,73	4,14	0,48
		20 – 40	5,51	10,9	0,39	51,65	5,59	4,22	0,52
		40 – 60	5,34	8,2	0,34	37,00	7,30	4,81	1,24
Dassa	Miniffi 1	0 – 20	7,32	8,4	0,59	53,04	3,32	2,31	2,21
		20 – 40	7,14	7,9	0,34	47,80	3,89	2,72	1,48
		40 – 60	6,74	5,9	0,28	40,86	4,45	3,39	2,12
	Miniffi 2	0 – 20	8,3	17,5	0,73	57,05	5,59	2,47	1,77
		20 – 40	7,73	8,8	0,28	31,61	3,32	2,72	0,94
		40 – 60	6,03	8,5	0,25	29,29	5,59	3,56	1,14

Tableau 3.2. Propriétés chimiques du sol avant l'installation des essais date de semis

Sites	Villages	Profondeurs (cm)	pH(H ₂ O)	C-org (g/kg)	N-total (g/kg)	P-Bray 1 (mg/kg)	Bases échangeables (cmol/kg)		
							Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
Dogbo	Ayomi	0 – 20	6,40	15,20	0,67	45,48	2,75	2,56	0,81
		20 – 40	6,43	8,97	0,53	43,17	3,32	2,31	1,00
		40 – 60	6,34	7,79	0,56	40,86	3,32	3,39	1,11
	Dévé	0 – 20	6,63	17,98	0,81	48,55	1,61	2,06	1,29
		20 – 40	6,68	15,47	0,67	44,71	2,18	2,64	1,42
		40 – 60	6,36	11,04	0,50	37,77	3,32	2,56	1,77
Allada	Attogon	0 – 20	6,58	9,0	0,64	33,92	0,48	1,14	1,81
		20 – 40	6,44	3,8	0,36	32,76	1,61	1,73	1,71
		40 – 60	6,23	3,2	0,34	26,98	1,05	1,98	1,54
Centre	Gomé	0 – 20	6,36	7,1	0,31	33,92	1,61	2,14	1,81
		20 – 40	6,31	6,0	0,25	32,98	1,05	2,14	1,92
		40 – 60	6,60	2,5	0,25	25,44	2,18	2,47	1,23

Doses optimales de N, P et K pour une meilleure productivité du maïs

L'analyse des résultats de la régression quadratique des rendements grains et paille du maïs au niveau des trois sites (Tableau 4.1) a révélé qu'une parabole permet une meilleure estimation des rendements considérant les différentes doses de N. Les résultats ont montré également que la dose optimale de N a été de 80,5 kg/ha pour une meilleure production en grain et en paille de maïs au sud et au centre Bénin. De façon spécifique, cette dose a permis d'obtenir des rendements grains de maïs si les deux autres nutriments sont à leur niveau optimal de $3,18 \pm 0,29$; $2,25 \pm 0,03$ et $2,58 \pm 0,21$ t MS/ha respectivement pour les sites de Dogbo, Allada et centre. Les rendements pailles associés sont respectivement de $4,55 \pm 0,25$; $4,96 \pm 0,68$ et $5,20 \pm 0,39$ t MS/ha.

Tableau 4.1. Régression quadratique des rendements grains et paille du maïs suivant les doses de N dans les sites d'étude

Sites	Paramètres	ddl	Rendement grain		Rendement paille	
			Coefficient	Pr > t	Coefficient	Pr > t
Dogbo	Constante	1	-2.755,14	0,8817	239,86	0,9875
	Dose N	1	143,77519	0,7586	103,60	0,7869
	(Dose N) ²	1	-0,870059	0,7641	-0,6214	0,7937
	Optimum de N		80,5 kg N/ha		80,5 kg N/ha	
Allada	Constante	1	-1.532,00	0,4091	-16.682,00	0,6962
	Dose N	1	92,757246	0,0761	483,40	0,6528
	(Dose N) ²	1	-0,568841	0,0785	-2,664471	0,6886
	Optimum de N		80,5 kg N/ha		80,5 kg N/ha	
Centre	Constante	1	-3.168,42	0,7981	-7.876,07	0,7371
	Dose N	1	133,99	0,6669	326,97	0,5795
	(Dose N) ²	1	-0,7773	0,6871	-2,0446	0,5762
	Optimum de N		80,5 kg N/ha		80,5 kg N/ha	

L'analyse des résultats de la régression quadratique des rendements grains et paille des trois sites (Tableau 4.2) a révélé qu'une droite linéaire permet une meilleure estimation des rendements considérant les différentes doses de P. Les résultats ont montré également que la dose optimale de P a été de 22,5 kg/ha pour une meilleure production en grain et en paille au sud et au centre Bénin avec des rendements grains si les deux autres nutriments sont à leur niveau optimal de $2,54 \pm 0,18$ t MS/ha, $2,06 \pm 0,10$ t MS/ha et $2,51 \pm 0,13$ t MS/ha respectivement pour les sites de Dogbo, Allada et centre. Les rendements en paille associés sont de $4,38 \pm 0,19$ t MS/ha, $5,06 \pm 0,25$ t MS/ha et $5,17 \pm 0,32$ t MS/ha.

Tableau 4.2. Régression quadratique des rendements grains et paille du maïs suivant les doses de P dans les sites d'étude

Sites	Paramètres	ddl	Rendement grain		Rendement paille	
			Coefficient	Pr > t	Coefficient	Pr > t
Dogbo	Constante	1	2.352,33	0,0136	3.863,50	<0,0001
	Dose P	1	8,177778	0,7460	22,9167	0,3705
	Optimum de P		22,5 kg P/ha		22,5 kg P/ha	
Allada	Constante	1	1.906,00	0,0002	4.193,75	0,0001
	Dose P	1	6,766667	0,6355	38,65	0,2630
	Optimum de P		22,5 kg P/ha		22,5 kg P/ha	
Centre	Constante	1	2.326,37	< 0,0001	5.087,00	0,0002
	Dose P	1	8,325	0,6325	3,625	0,9335
	Optimum de P		22,5 kg P/ha		22,5 kg P/ha	

Les résultats de l'analyse de la régression quadratique des rendements grains et paille vis-à-vis des doses de K au niveau des trois sites (Tableau 4.3) ont montré qu'une parabole permet une meilleure estimation des rendements. La dose optimale de K a été de 20 kg/ha pour une meilleure production en grain et en paille au sud et au centre Bénin avec des rendements grains si les deux autres nutriments sont à leur niveau optimal de $3,12 \pm 0,21$ t MS/ha, $1,85 \pm 0,15$ t MS/ha et $2,70 \pm 0,50$ t MS/ha respectivement pour les sites de Dogbo, Allada et centre. Les rendements en paille correspondants sont de $4,99 \pm 0,26$ t MS/ha, $4,54 \pm 0,46$ t MS/ha et $4,31 \pm 0,42$ t MS/ha.

Tableau 4.3. Régression quadratique des rendements grain et paille du maïs suivant les doses de K dans les sites d'étude

Sites	Paramètres	ddl	Rendement grain		Rendement paille	
			Coefficient	Pr > t	Coefficient	Pr > t
Dogbo	Constante	1	2.765,25	<0,0001	4.433,5	<0,0001
	Dose K	1	30,615417	0,2511	53,010833	0,1039
	(Dose K) ²	1	-0,647417	0,3277	-1,251833	0,1241
	Optimum de K		20 kg K/ha		20 kg K/ha	
Allada	Constante	1	1.560,75	<0,0001	3.872,5	<0,0001
	Dose K	1	13,946667	0,4677	21,73	0,7080
	(Dose K) ²	1	0,031333	0,9473	0,578750	0,6907
	Optimum de K		20 kg K/ha		20 kg K/ha	
Centre	Constante	1	2.453,33	0,0017	3.772,3333	< 0,0001
	Dose K	1	11,965556	0,8494	11,476111	0,8295
	(Dose K) ²	1	0,023778	0,9880	0,761222	0,5733
	Optimum de K		20 kg K/ha		20 kg K/ha	

Effet des différentes périodes de semis sur le rendement du maïs

Les résultats de l'analyse de variance (Tableau 5) relative à l'effet des différentes périodes de semis sur les rendements grains et paille du maïs ont montré que les sites, les périodes de semis et même l'interaction sites x périodes de semis ont une influence hautement significative ($p < 0,01$ à $p < 0,001$) sur les deux paramètres de rendement.

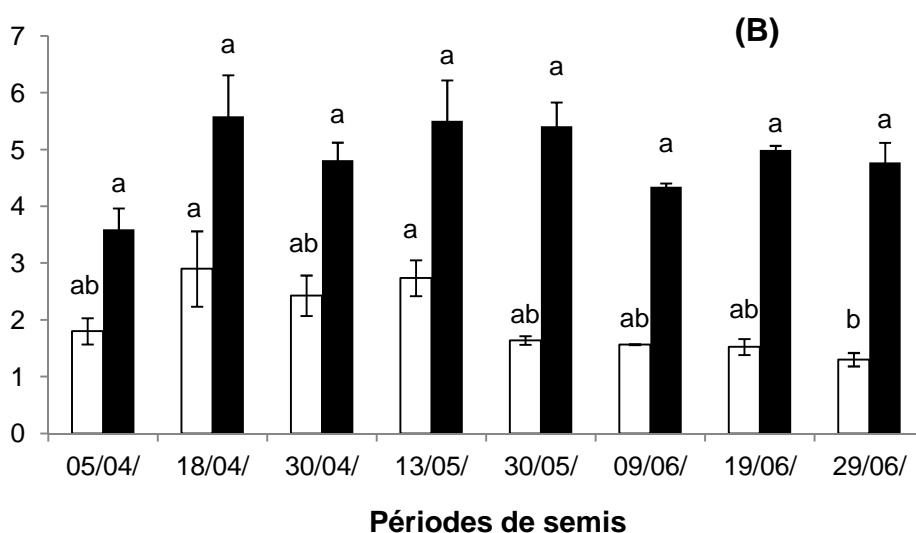
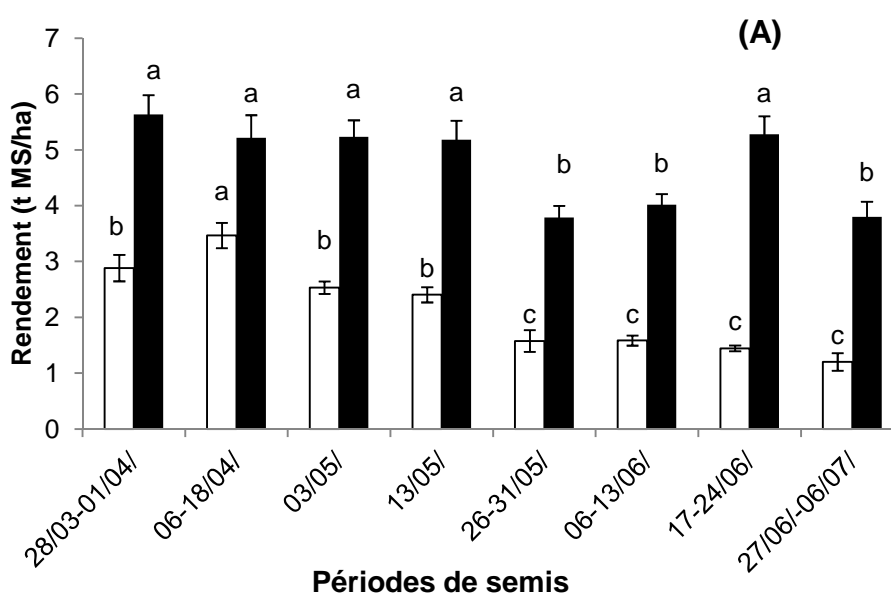
Tableau 5. Tableau d'analyse de variance à deux facteurs considérant les sites et les périodes de semis du maïs pour les rendements grains et paille

Source de variation	Degré de liberté (ddl)	Valeurs de F pour le rendement en	
		Grain	Paille
Sites	2	9,17 ***	51,94 ***
Périodes de semis	7	18,79 ***	3,29 **
Sites*Périodes de semis	11	2,95 **	4,04 ***

** : P < 0,01 ;

*** : P < 0,001

L'analyse des résultats de l'effet des différentes périodes de semis sur les rendements grains et paille du maïs au niveau des sites du sud (Figures 1A et 1B respectivement à Allada et à Dogbo) et du centre (Figure 2) a montré que, les rendements grains et paille sont significativement différents ($p < 0,05$) au sein de chaque site à l'exception des rendements paille à Allada. En effet, les rendements moyens grains et paille les plus élevés ont été obtenus pour les semis du 6 au 18 Avril à Dogbo ($3,46 \pm 0,23$ t MS/ha et $5,22 \pm 0,40$ t MS/ha respectivement pour les rendements grains et paille), les semis du 18 Avril au 13 Mai à Allada (avec des rendements grains variant entre $2,43 \pm 0,36$ et $2,90 \pm 0,66$ t MS/ha et des rendements paille variant entre $4,81 \pm 0,31$ t MS/ha et $5,59 \pm 0,73$ t MS/ha) et les semis du 17 au 31 Mai au centre (avec des rendements grains variant entre $2,08 \pm 0,26$ et $2,69 \pm 0,35$ t MS/ha et des rendements pailles variant entre $3,41 \pm 0,08$ t MS/ha et $3,74 \pm 0,39$ t MS/ha).



□ Rendement grain ■ Rendement paille

Les barres d'erreur représentent les erreurs standards.

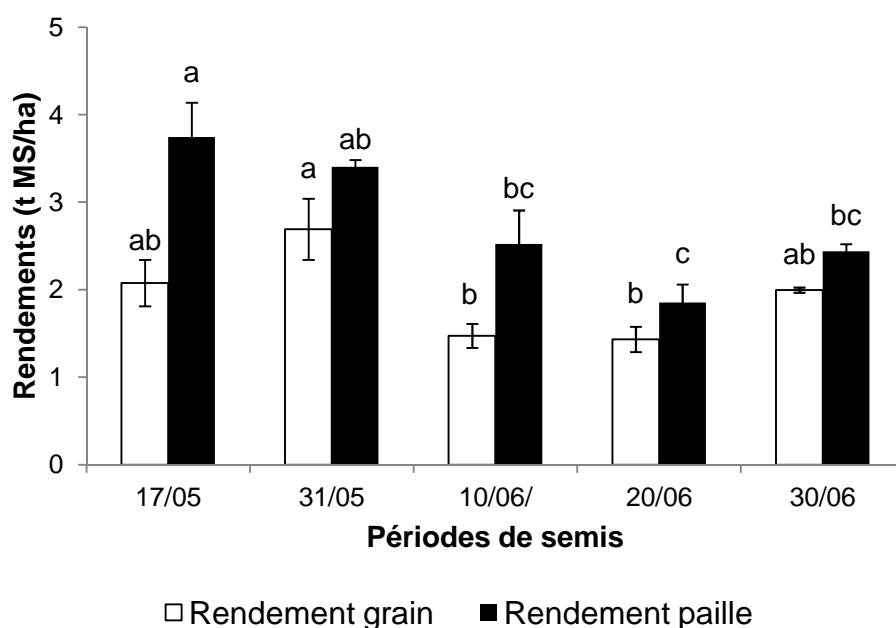
Les barres portant la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 1. Effet des différentes périodes de semis au cours de l'année 2011 sur les rendements grains et paille du maïs au Sud-Bénin

Légende :

Figure 1A : résultats obtenus à Allada

Figure 1B : résultats obtenus à Dogbo



Les barres d'erreur représentent les erreurs standards.

Les barres portant la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 2. Effet des différentes périodes de semis au cours de l'année 2011 sur les rendements grains et paille du maïs au Centre-Bénin

DISCUSSION

L'analyse des résultats des propriétés chimiques initiales des sols d'expérimentation montre que les sols des trois sites sont légèrement acides. De plus, les sols de Dogbo présentent un faible niveau de fertilité caractérisé par un rapport C/N élevé au niveau de la couche arable comparativement aux sols des deux autres sites. Ce sol présente également un niveau de phosphore assimilable élevé comparativement à celui des autres sites. En général dans les sols des zones d'étude, la somme des bases échangeables et la capacité d'échange cationique sont faibles; ce qui traduit leur faible fertilité, comme l'ont signalé Adjanooun *et al.* (2011). L'information la plus marquante est que dans les sols des zones d'étude, le potassium est globalement déficitaire par rapport au calcium et au magnésium. Mieux, on note des déséquilibres entre le calcium, le magnésium et le phosphore. Ces résultats, qui sont en conformité avec ceux rapportés par Adjanooun (2006), démontrent qu'il est nécessaire d'apporter des nutriments au sol car les quantités de nutriments que contiennent ces sols sont insuffisantes pour satisfaire les besoins du maïs (Yallou *et al.*, 2010).

Des résultats de la présente étude, les rendements grains et paille varient en fonction de la variation des doses de N, P et K. Mieux, l'azote est le nutriment qui favorise plus une augmentation du rendement sur les deux types de sol. Ces résultats corroborent ceux de Ziadi *et al.* (2006) qui ont montré que la limitation en élément azoté est la principale contrainte de la production des céréales en Afrique Sub-Saharienne. Selon Brassard (2007), l'azote est un nutriment prépondérant pour les céréales; toutefois, il n'est complètement valorisé que si les quantités de P et K disponibles sont suffisantes. Elalaoui (2007) rapporte que la nutrition des céréales en général et celle du maïs en particulier, est efficace lorsque les deux macronutriments P et K sont en quantités suffisantes dans la solution du sol. Cette affirmation traduit la loi de Mitscherlich à travers la complémentarité entre éléments majeurs.

L'analyse des résultats de la régression quadratique des rendements grains et paille montre que les niveaux optima des nutriments N, P et K sont identiques pour les trois sites et sont respectivement de 80,5 kg N/ha, 22,5 kg P/ha et de 20 kg K/ha. L'optimum obtenu pour l'azote est conforme à la valeur de 80 kg/ha, rapportée par Ezui *et al.* (2011) pour les zones Sud et Centre du Bénin. En ce qui concerne les doses optimales de P et K, elles sont inférieures aux doses de 30 kg P/ha et entre 0 et 40 kg K/ha déterminées par Ezui *et al.* (2011). Cette différence peut s'expliquer par les précédents

culturaux et les niveaux des nutriments introduits dans le modèle DSSAT lors de la simulation. En effet, les niveaux utilisés pour la simulation étant de 0 ; 30 et 60 kg/ha pour le P alors qu'ils sont de 0 ; 40 et 80 kg/ha pour le K. L'écart entre ces niveaux étant trop élevé, le modèle a dû déduire le niveau qui procure des rendements optimum. Toutefois, le modèle a permis de retenir des 36 traitements issus de la combinaison de 4 doses d'azote (0, 40, 80 et 120 kg/ha), 3 doses de Phosphore (0, 30, et 60 kg/ha) et 3 doses de Potassium (0, 40, et 80 kg/ha), deux formulations qui donnent des rendements optimum sur une trentaine d'années de simulation.

Les différentes périodes de semis ont une influence significative ($P < 0,05$) sur les rendements grains et paille. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés par Verma (2011) qui a démontré l'effet de la période de semis sur la croissance, le développement et le rendement de maïs. Les rendements moyens grains et paille les plus élevés sont obtenus pour les semis du mois d'Avril au sud Bénin et du mois de Mai au centre Bénin. La variabilité des périodes optimales de semis entre le sud et le centre Bénin est due aux différents types de climat caractérisant les deux zones. Cette amélioration de rendement observée avec les périodes propices de semis du maïs dans ces zones peut s'expliquer par le fait que les semis ont été réalisés à une période favorable au développement des plants lesquels ont bien levé et ont connu une bonne croissance. En plus de ces facteurs, un niveau probable de CO₂ élevé utilisé par la plante pour la production d'une plus grande quantité de matière sèche peut être à la base de cette amélioration de rendements. Ceci est caractérisé par une augmentation de la photosynthèse par unité de surface des feuilles et l'augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau et d'augmentation des taux de photo-respiration (Attri et Rathore, 2003). En effet, l'augmentation du CO₂ atmosphérique peut favoriser la photosynthèse et dans ce cas augmenter la production de biomasse donc la productivité (Meza *et al.*, 2008). Kolawolé et Samson (2009) rapportent que l'accroissement des rendements de maïs est dû aux caractéristiques des épis. Les résultats obtenus confirment ceux déterminés par Ezui *et al.* (2011) qui ont obtenu à partir du modèle DSSAT que les périodes propices au semis du maïs sont autour du mois d'avril au sud et de mai au centre Bénin.

Les semis tardifs entraînent l'obtention de faibles rendements en grains parce qu'ils favorisent, l'attaque par les oiseaux granivores. Mieux, plus le semis est très tardif, plus les risques de stress hydrique sont élevés. Les semis tardifs engendrent des plants le plus souvent chétifs et rabougris à cause du manque d'humidité dans le sol pour faciliter l'assimilation des éléments nutritifs et l'alimentation hydrique de la plante (Asadi et Clemente, 2003). Les semis tardifs coïncident avec la période de grande transpiration par la plante avec des effets négatifs pour la production de grains (Soler *et al.*, 2007).

CONCLUSION

A travers l'étude, les niveaux optima de N, P et K obtenus lors des essais au champ sont identiques pour les sites du Sud et du Centre du Bénin. La combinaison d'engrais minéraux N_{80,5}P_{22,5}K₂₀ est l'optimale pour l'obtention des rendements élevés de maïs en grains et paille. Les différentes périodes de semis influencent grandement les niveaux de rendements en grains et paille de maïs. Les semis aux mois d'Avril au sud et de Mai au centre Bénin sont les périodes propices permettant d'obtenir de meilleurs rendements du maïs avec moins de risques associés à la variabilité pluviométrique. L'étude mérite d'être poursuivie dans les autres zones agro-écologiques du Bénin dans la perspective de proposer aux producteurs de maïs des formules d'engrais et des périodes de semis.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Projet de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest (PPAAO) qui a i) organisé l'atelier au cours duquel le bilan des travaux de recherche sur la gestion de la fertilité des sols pour accroître la productivité agricole en Afrique de l'Ouest a été fait et ii) facilité la publication des résultats de leurs travaux de recherche dans le présent Numéro Spécial du BRAB.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adjanohoun A. 2006. Nutrition du manioc sous différentes combinaisons de NPK au Sud du Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*. 52 : 1-6.
- Adjanohoun A, Baba-Moussa L, Glèlè Kakai R, Allagbé M, Yèhouéno B, Gotoéchan-Hodonou H, Sikirou R, Sessou P et Sohounhloué D. 2011. Caractérisation des rhizobactéries potentiellement promotrices de la croissance végétative du maïs dans différents agrosystèmes du Sud-Bénin. *International Journal of Biology and Chemical Sciences*. 5: 433-444. <http://ajol.info/index.php/ijbcs>.

- Asadi, M.E., Clemente, R.S., 2003: Evaluation of CERES-Maize of DSSAT model to simulate nitrate leaching, yield and soil moisture content under tropical conditions. *Food, Agriculture & Environment*, 1 (3 & 4): 270-276.
- Attri, S.D., Rathore, L.S., 2003: Simulation of impact of projected climate change on wheat in India. *International Journal of Climatology*, 23, 693–705.
- Balogoun, I., 2012 : Essais de validation des formules d'engrais et des périodes de semis recommandées par le modèle DSSAT pour la production de maïs (*Zea mays* L.) au Sud et Centre Bénin. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 78 p.
- Brassard, M., 2007 : Développement d'outils diagnostiques de la nutrition azotée du maïs-grain pour une gestion optimale de l'engrais azoté. Mémoire de maîtrise. Université de Laval, 105 p.
- Dugué, P., 2010 : Développement des systèmes de production durables dans les projets vivriers. In Etude d'évaluation environnementale et du développement de systèmes de production durables dans le cadre des projets de soutien à la production vivrière (Bénin, Togo, Ghana). FARM CIRAD, Ghana, 135 p.
- Elalaoui, A.C., 2007. Fertilisation minérale des cultures : les éléments fertilisants majeurs (Azote, Potassium, Phosphore). *Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA* n°155, 4 p.
- Ezui, G., A.M. Igué, P. Attiogbe, A. Mando., J.M. Sogbedji, T. Pare, S. Youl, P. Wilkens, U. Singh, O. Gist, 2011: Mise à jour des recommandations d'engrais pour la production du maïs en Afrique de l'Ouest : Cas du Bénin. Poster, IFDC, Lomé, Togo.
- Kolawole, E., Samson, U., 2009: Growth and Yield of Maize as Influenced by Sowing Date and Poultry Manure Application. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 37, 199-203.
- Meza, F.J., D. Silva, H. Vigil, 2008 : Climate change impact on irrigated maize in mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. *Agricultural systems*, 98, 21-30.
- Oga, C.A., 2012 : Date de semis et formule d'engrais pour une meilleure productivité du maïs (*Zea mays*) sur sol ferrugineux tropicaux au Centre Bénin. Mémoire d'ingénieur agronome, Faculté d'Agronomie, Université de Parakou, Bénin. 75 p.
- Saïdou, A., B.H. Janssen, E.J.M. Jemminghoff, 2003 : Effects of soils properties, mulch and NPK fertilizer on maize yields and nutrient budgets on ferralitic soil in southern Benin. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 100, 265-273.
- Saïdou, A., D. Kossou, C. Acakpo, P. Richards, W.T. Kuyper, 2012: Effects of farmers' practices of fertilizer application and land use types on subsequent maize yield and nutrient uptake in Central Benin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(1): 363-376.
- Soler, C.M.T., P.C. Sentelhas, G. Hoogenboom, 2007: Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal of Agronomy*, 27, 165–177.
- Verma, N.K., 2011: Integrated nutrient management in winter maize (*Zea mays* L.) sown at different dates. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 3(8): 161-167.
- Yallou CG, Aïhou K, Adjanohoun A, Baco M N, Sanni O A, Amadou L. 2010. Répertoire des variétés de maïs vulgarisées au Bénin. Document technique d'information et de vulgarisation. Dépôt légal N° 4920 du 03/12/2010, du 4ème trimestre, Bibliothèque Nationale (BN) du Bénin. ISBN: 978-99919-368-3-3-4, 19 p.
- Ziadi, N., B. Gagnon, P. Rochette, D. Angers, M. Chantigny, 2006: Nitrogen use efficiency and N₂O emission reduction in corn receiving mineral fertilizers. *Rapport de projet*, 12 p.