



Influence du potassium dans la production du maïs (*Zea mays L. variété Espoir*) dans la vallée du Niari (Congo).

Marc MANKOUSSOU¹, Fidèle MIALOUNDAMA² et Jean DIAMOUANGANA³

¹Doctorant en Sciences biologiques, Faculté des sciences et Techniques de l'Université Marien Nguabi de Brazzaville,

²Laboratoire de Biologie et Physiologie végétale, Faculté des sciences et Technique de l'Université Marien Nguabi de Brazzaville,

³Groupement pour l'Étude et la conservation de la Biodiversité pour le Développement (GECOBIDE)

Correspondances : mankoussouk@yahoo.fr ; mialoundamaf@yahoo.fr ; dia_jean@yahoo.fr

Original submitted in on 22nd November 2016. Published online at www.m.elewa.org on 31st March 2017
<http://dx.doi.org/104314/jab.v111i1.5>

RESUME

Objectif : Étudier l'influence du potassium dans la production de maïs (*Zea mays L. var. Espoir*) dans la Vallée du Niari en République du Congo en recherchant des traitements d'engrais susceptibles d'améliorer le rendement de cette culture.

Méthodologie et résultats : L'étude a été conduite au cours de la saison culturale 2013-2014 sur les deux (2) sites du Groupement pour l'étude et la Conservation de la Biodiversité pour le Développement (Gecobide) à Loutété, sur la variété « Espoir ». Une variété de maïs importée du Burkina Faso par le ministère de l'agriculture et de l'élevage du Congo, en vue de relancer la production de cette culture. Cinq (5) traitements d'engrais ont été appliqués. Il s'agit de: T0 (témoin absolu) ; T1= calcaire (1000 kg/ha) + fumier de poules (1500 kg/ha) + Urée (100 kg/ha) + NPK (150 kg/ha); T2 = calcidel (10 l/ha) + protaminal (10 l/ha) + huminal (20 l/ha); T3 = calcidel (10 l/ha) + protaminal (10 l/ha); et T4 = calcaire (1000 kg/ha) + fumier de poules (1500 kg/ha). L'essai a été suivant un dispositif en bloc aléatoire complet avec 3 répétitions. Aucun traitement phytosanitaire n'a été effectué pendant les trois mois de culture. Des analyses de sols de sites d'essais et de feuilles récoltées au stade floraison ont été réalisées au CIRAD-Montpellier en France. Les données recueillies ont fait l'objet d'analyse statistique à l'aide du logiciel Microsoft Software, 2007. Le test de Newman-Keuls a permis de faire le classement des moyennes grâce à une analyse de variance au seuil de 5%. L'analyse des composantes principales a été réalisée pour caractériser l'influence du K sur les composantes de croissance végétative et de rendement. L'étude a montré que les sols sont acides et déficients en K échangeable (0,14 à 0,30 mé /100g). La teneur foliaire moyenne en K = 2,621 % était bonne et traduisait le bon niveau en K qui devrait être recherché dans les sols de la vallée du Niari en culture de maïs. Les plus fortes corrélations ont été celles qui existent entre la teneur foliaire en K et les composantes de croissance végétative : HPF($r = 0,57, p < 0,01$), BT($r = 0,69, p < 0,01$) et BR ($r = 0,72, p < 0,01$) et DPF ($r = 0,45, p < 0,05$) ainsi que de rendement PEC ($r = 0,46, p < 0,05$). Les différents traitements ont influencé positivement et significativement ($p < 0,05$) les composantes végétatives et de rendement de maïs grain. L'application du traitement T1 a produit des valeurs maximales

pour tous les traits étudiés, le rendement en maïs grain particulièrement de 5,76 t ha⁻¹, suivi des T2 et T4 avec des rendements respectifs en maïs grain 4,95 et 4,77 t ha⁻¹.

Conclusion et application des résultats : L'étude a permis de mettre en évidence l'influence de potassium dans l'accroissement des composantes végétatives et de rendement de maïs grain. L'étude a révélé qu'en général les sols de la vallée du Niari sont acides et déficients en K échangeable. Les apports potassiques sont donc essentiels pour améliorer le niveau en K échangeable de ces sols, et par conséquent l'accroissement des composantes végétatives et de rendement. Le traitement T1 se révèle être la fumure susceptible d'améliorer significativement les composantes végétatives et de rendement du maïs grain par rapport aux autres traitements. Les traitements T1, T2 et T4 avec des potentiels élevés en K et qui ont eu les meilleurs rendements en maïs grain, peuvent être utilisés et contribués à l'amélioration de la production de maïs dans la vallée du Niari.

Mots - clés : maïs rendement, fumier de poules, engrais minéraux, calcaire, potassium, Vallée du Niari.

Influence of potassium in the production of maize (*Zea mays L. variety Espoir*) in the Niari Valley (Congo).

ABSTRACT

Objective: Study the influence of the potassium in the production of the corn (*Zea mays L. var. Espoir*) in the valley of Niari in the Republic of the Congo and identify treatments of fertilizer that can improve the performance of this culture.

Methodology and Results: The study was conducted during the season crop 2013-2014 on two (2) sites of the group for the study and Conservation of biodiversity for development (Gecobide) at Loutete, on the variety "Espoir". A variety of corn imported Burkina Faso by the Ministry of agriculture and livestock of the Congo to relaunch the production of this crop. Five (5) fertilizer treatments were applied. It's: T0 (absolute witness); T1 = (1000 kg/ha) limestone + manure from hens (1500 kg/ha) + (100 kg/ha) urea and NPK (150 kg/ha); T2 = calcidel (10 l/ha) + protaminal (10 l/ha) + huminal (20 l/ha); T3 (calcidel (10 l/ha) + protaminal (10 l/ha); and T4 (limestone (1000 kg/ha + hens (1500 kg/ha) manure.). The trial has been installed following a complete block random device with 3 replicates. No phytosanitary treatment were made during the three months of culture. Analyzes of the soil of the test sites and of the leaves harvested at the flowering stage were carried out at CIRAD-Montpellier (France). The data collected have been statistical analysis using Microsoft 2007 software. The Newman-Keuls test helped do the ranking of the medium through an analysis of variance to the 5% threshold. The principal components analysis was conducted to characterize the influence of the K on the vegetative growth and yield components. The study showed that soils are acidic and deficient in exchangeable potassium (0.14 to 0.30 me/100g). The average foliar K = 2,621% content was good and reflected the good level in exchangeable K which should be sought in the soils of the Valley of the Niari in corn. The strongest correlations were those between the foliar K content and components of vegetative growth: HPF ($r = 0,57, p < 0,01$), BT ($r = 0,69, p < 0,05$) et BR ($r = 0,72, p < 0,05$) and DPF ($r = 0,45, p < 0,05$) as well as those of the corn grain yield PEC ($r = 0,46, p < 0,05$). The various treatments have influenced positively and significantly ($p < 0,05$) corn grain yield and vegetative components. The application of treatment T1 produced maximum values for all studied traits, corn grain 5.76 t ha⁻¹ realizing performance-, followed T2 and T4 with respective yields in corn grain of 4.77 and 4.95 t ha⁻¹.

Conclusion and application of results: The study to highlight the influence of the potassium in the increase of vegetative components and yield of corn grain. The study found that in general the Niari Valley soils are acidic and deficient exchangeable potassium. Potassium flows are therefore essential to increase the exchangeable K of these soils, and therefore the increase of vegetative components and performance. Treatment T1 has revealed being the manure to improve significantly both vegetative performance and of the corn grain by report other treatments. T1, T2, and T4 treatments with potential high K, who had the best

corn grain yields can be used and contribute to the improvement of the production of the corn in the Niari Valley.

Key words: corn yield, chicken manure, mineral fertilizer, limestone, potassium, Niari Valley.

INTRODUCTION

Le maïs est cultivé au Congo dans toutes les zones agroécologiques et la production nationale est estimée à 14.000 tonnes (FAOSTAT, 2013). La demande nationale en maïs est extrêmement importante pour l'alimentation animale et les brasseries ; elle dépasse largement l'offre. La Vallée du Niari, considérée comme le grenier du Congo, depuis l'année 2008, de nombreuses sociétés agricoles s'y installent pour produire du maïs afin de répondre à la demande nationale. Malheureusement les rendements obtenus sont faibles ; moins de 1 t.ha⁻¹ pour les paysans (SOFRECO, 2012) et de l'ordre 1,5 à 3,1 t.ha⁻¹ (SARIS, 2012 et IPHD, 2013). En dépit, des technologies agricoles modernes utilisées (mécanisation agricole, semences améliorées, engrais minéraux et techniques culturales), le fossé entre moyens techniques déployés et rendements obtenus demeure encore très important. L'expérience du monde entier montre que plus de 50 % de l'augmentation des rendements des cultures de production est due

aux engrais (Braun et al., 1983). L'exigence de maïs en potassium est aussi élevée que celui de l'azote. Il prend jusqu'à 38 % du K total pour toute la saison de croissance, pendant 38 à 52 jours après le semis (Hanway, 1962). Les sols déficients en potassium présentent beaucoup d'anomalies, comme la réduction du taux de photosynthèse chez le maïs; réduction de la densité et de la longueur totale des racines après le stade de croissance, affectant le niveau de l'activité des stomates et entraînant d'énormes pertes d'eau (Terry et al, 1973 ; Roshani et al., 2010). Plusieurs études ont montré que les teneurs en potassium échangeable de sols de vallée du Niari sont faibles (Denis et al., 1975; Bosseno 1981 ; et Nzila, 1986). C'est pour cette raison, étant entendu que le potassium est considéré comme un macronutriment vital dans la croissance, le développement des plantes et la production agricole durable, que nous avons étudié l'influence du potassium dans la production du maïs (*Zea mays* L.) dans la vallée du Niari.

MATERIEL ET METHODES

Le site d'étude et le matériel végétal : L'étude a été conduite à Loutété dans la vallée du Niari, qui s'étend entre 12°30 et 14° de longitude est et 2°30 et 4°30 de latitude sud. La pluviométrie gravite entre 1.000 et 1.400 mm d'eau par an. Les températures moyennes sont de l'ordre de 23 à 25°C. Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle sont en moyennes comprises entre 1119 et 1314 mm par an. Le sol est ferrallitique fortement désaturé à texture argileuse, le pH varie entre 4,8 et 6,4, le taux d'argile de 27,17 et 72,3 % ; celui de limons de 14,1 et 51,94 % et celui de sables de 5,25 et 62,9 %. Le taux de matière organique des horizons de surface est assez bon et varie entre 2,2 à 6 %, la teneur en phosphore assimilables de 5,58 et 81,93 mg/kg et le rapport C/N varie de 9,25 et 22. La teneur en Ca²⁺ varie entre 0,39 et 6,1 mé/100 g, celle en Mg²⁺ de 0,01 à 1,40 mé/100 g et celle en K⁺ tourne entre 0,05 et 0,31 mé/100 g (Denis et al., 1975 et Bosseno, 1981). Le matériel végétal utilisé était le maïs

"variété *Espoir*", importée du Burkina Faso. Cette variété a été préférée en raison de son rendement potentiel élevé (6 à 7 t/ha à une densité de 53333 plants/ha) et pour sa résistance aux maladies et aux ravageurs.

Composition des amendements et engrais minéraux utilisés : Le calcaire utilisé comme amendement, provenait de l'usine de broyage du calcaire de Madingou, sa composition moyenne est : CaO (51,50); MgO (2,05); K₂O (0,12); SiO₂ (4,25); Al₂O₃ (1,00) et Fe₂O₃ (0,68) (Djondo, 1994). Les fumiers de poules provenaient de la ferme avicole N'semi, de composition en matière sèche: Ntotal (4,4 %); P (2,1 %); K (2,6 %); Ca (2,3 %); Mg (1,0 %); S (0,6 %); Fe (1000 mg) ; Mn (413mg) ; Zn (480 mg) ; Cu (172 mg) (Brady et Weil, 1996). Les engrais minéraux liquides utilisés provenaient de Delbon (2009) (France) : huminal : 70g/l (N), 31g/l (P₂O₅), 40g/l (K₂O), 65g/l (Acide hydrique et fulviques) et 525g/l (M.O);

calcidel : 10,4 (% CaO), 1,4 (% Mg) et 0,3 (% B) ; et protaminal : 77g/l (Ntotal), 30g/l (P₂O₅), 16g/l (K₂O) et 537g/l (M.O). L'Urée (46% N) et le NPK (17-17-17) ont été appliquées.

Dispositif expérimental et conduite de l'étude : L'essai a été installé suivant un dispositif en bloc aléatoire complet, composé de 5 traitements et de 3 répétitions. Les parcelles élémentaires étaient constituées de 5 lignes de 5 mètres de longueur distantes de 0,80 m. Le précédent cultural était une jachère travaillée. Une graine a été semée à 3 cm de profondeur avec un espacement de 0,25 cm entre les poquets. Une semaine après la levée, les manquants ont été complétés afin de maintenir la densité 50.000 plants.ha⁻¹. Les traitements appliqués : T0 (témoin absolu) ; T1= calcaire (1000 kg/ha) + fumier de poules (1500 kg/ha) + Urée (100 kg/ha) + NPK (150 kg/ha); T2 = calcidel (10 l/ha) + protaminal (10 l/ha) + huminal (20 l/ha); T3 = calcidel (10 l/ha) + protaminal (10 l/ha); et T4 = calcaire (1000 kg/ha) + fumier de poules (1500 kg/ha). Le calcaire et le fumier de poules ont été apportés pendant la préparation du sol. Le NPK a été apporté une semaine après la levée. L'urée et le protaminal ont été apportés en deux fractions : la 1^{ère} semaine après le semis et à la montaison. Le calcidel et l'huminal ont été apportés en deux fractions : 1^{ère} et 3^{ème} semaines après la levée. L'entretien de la culture a été fait manuellement.

Composantes mesurées et analysées : Les mesures ont été réalisées sur 20 plantes choisies aléatoirement au niveau des parcelles désignées "traitements". Les principales composantes ont été mesurées pour caractériser les effets des traitements sur la croissance et le rendement en maïs grain. Il s'agit des

composantes: hauteur de la plante (HPF) ; hauteur d'insertion de l'épi (HIE) ; diamètre du plant au collet à la floraison (DPF); nombre d'épis récoltés (NER); nombre de pieds avec plus d'un épi (NPPE) ; poids des épis au champ (PEC); biomasse totale (BT); et biomasse racinaire (BR). Les mesures initiales ont été faites à la floraison et les dernières ont été réalisées à la récolte. Les composantes du rendement ont été déterminées à partir des récoltes obtenues. Des prélèvements d'échantillons de sols dans l'horizon superficiel (0 - 20 cm) et des prélèvements des feuilles à la floraison ont été effectués. Les analyses physico-chimiques de sols et l'analyse foliaire ont été réalisées au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) - Montpellier (France). Les résultats obtenus ont été analysés à l'aide du logiciel GenStat Release Discovery Edition 10.3. Les analyses ont été réalisées à partir du logiciel Microsoft Office Excel, version 2007 (Microsoft Software, 2007). Le test de Newman-Keuls a permis de faire le classement des moyennes grâce à une analyse de variance (ANOVA) au seuil de 1 % et 5 %. Un test de normalité a été effectué sur chaque variable pour valider les résultats de l'ANOVA. Pour sélectionner les variables explicatives qui expliquent mieux la variation du rendement constatée dans la zone d'étude, l'analyse des composantes principales (ACP) a été réalisée. La signification statistique des axes a été déterminée en utilisant le « Monte carlo permutation test » (999 permutations sans restriction, p < 0,05). La relation entre la production de maïs (PEC) et les autres traits étudiés a été établie. Les valeurs propres étaient axe₁ (34,0 %) : et axe₂ (35,5 %) et la matrice de corrélation a été établie.

RESULTATS

Caractéristiques physico-chimiques des sols des parcelles d'essai : Les résultats d'analyse de sols des sites d'essai sont consignés dans le tableau 1. Le pH eau moyen oscille entre de 5,5 et 6,9, l'azote total varie de 0,98 et 1,84 ‰; et le phosphore total de 0,504 à 1,01. La teneur en Ca²⁺ varie entre 4,30 et 9,29 mé/100g, celle en Mg²⁺ de 0,36 à 2,47 mé/100g et celle en K⁺ de 0,14 à 0,30 mé/100g. La teneur en K⁺ des sols est relativement très basse 0,14 à 0,30 mé/100g. La

granulométrie (A+L) varie entre 52 et 71,15%, l'Indice S₁ : MO %/(A+L %) de 6,43 et 7,89 à Kimbimbi. Le rapport C/N varie entre 10,25 et 14,36, celui du N/P₂O₅ de 0,15 et 0,41, le Ca²⁺/K⁺ de 24,58 et 57,87, et la balance cationique K⁺ x 100/(Ca²⁺ + Mg²⁺) varie entre 1,53 et 3,74%, et celle de K⁺ x 100/(Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺) de 1,55 et 3,60 %. Les résultats de Ca²⁺/K⁺ et K⁺ x 100/(Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺) montrent qu'il y a une carence nette du potassium dans ces sols.

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques des sols des parcelles d'essai et ratios obtenus avec les résultats d'analyse des sols

Mankoussou et al., J. Appl. Biosci. 2017 Influence du potassium dans la production du maïs (Zea mays L. variété Espoir) dans la vallée du Niari (Congo).

	Kimbimbi					Bellevue					MoyGen
	E1	E2	E3	E4	Avg.	E1	E2	E3	E4	Avg.	
pH Eau	5	5.15	5.75	6.16	5.51	6.8	7.1	6.9	6.9	6.92	6.21
pH KCl	4.11	4.19	4.95	5.34	4.64	6.0	6.3	6.0	6.1	6.10	5.37
M.org. (%)	4.54	4.49	5.05	5.45	4.88	nd	nd	nd	nd	nd	-
N total. (% ₀)	1.56	1.40	1.84	1.52	1.58	0.98	1.07	1.05	1.06	1.04	1.34
C. org.	2.19	1.80	2.64	2.63	2.31	nd	nd	nd	nd	nd	-
Phos total (% ₀)	1.01	0.91	0.98	0.82	0.93	0.50	0.55	0.52	0.54	0.52	0.72
Phos ass. mg/kg	3.80	4.20	14,0	7.00	7.25	6.30	6.50	4.90	3.00	5.10	6.17
Argile %	43,89	41.4	33,1	31.4	37.4	25.0	18.1	24.5	24.0	22.9	30.1
Lim fins %	18.82	22.2	23.6	34.5	24.8	19.2	25.2	20.7	22.2	21.8	23.3
Lim grossiers %	6.69	6.08	7.19	5.15	6.27	7.8	7.6	15.1	15.1	11.4	8.83
Sable fins %	11.67	12.6	13,1	10.7	12.0	19.2	18.1	19.5	18.6	18.8	15.4
Sable gros %	11.40	8.50	12.2	7.76	9.97	16.5	17.1	15.5	14.6	15.9	12.9
Ca ²⁺ mé/100g	4.30	4.18	7.86	5.21	5.38	6.44	9.26	6.86	7.38	7.48	6.43
Mg ²⁺ mé/100g	0.39	0.36	2.47	1.36	1.14	0.52	1.13	0.59	0.72	0.74	0.94
K ⁺ mé/100g	0.16	0.17	0.3	0.19	0.20	0.26	0.16	0.19	0.14	0.18	0.19
C/N	13.99	12,8	14.3	10.2	12.8	nd	nd	nd	nd	nd	-
N / P ₂ O ₅	0.41	0.33	0.13	0.21	0.21	0.15	0.16	0.21	0.35	0.20	0.20
MO% / (A + L%)	6.54	6.43	7.89	7.65	7.11	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ca ²⁺ / K ⁺	26.87	24.5	26.2	27.4	26.9	24.7	57.8	36.1	52.7	41.5	33.8
K ⁺ x 100/ Ca ²⁺ + Mg ²⁺	3.41	3.74	2.90	2.89	3.06	3.73	1.53	2.55	1.72	2.18	2.57
K ⁺ x 100/ (Ca ²⁺ + Mg ²⁺ + K ⁺)	3.29	3.60	2.82	2.81	2.9	3.60	1.55	2.48	1.69	2.1	2.95

Présentation des résultats de l'analyse foliaire : Les teneurs des macroéléments et microéléments dans les feuilles sont consignées dans le tableau 2. La teneur en N varie entre 1,984 et 2,800 % (2,269 % moyen), celle en P de 0,202 et 0,465 % (0,319% moyen), K de 2,138 et 3,592 % (2,621 % moyen) ; Ca de 0,462 et 0,975 % (0,711 % moyen) et Mg de 0,158 à 0,868 % (0,314 % moyen). Selon Loué (1984) la nutrition du maïs est bonne lorsque les teneurs en N sont comprises entre

2,76 et 3,5 %, en P entre 0,25 et 0,40 % et en K supérieures à 2,25 %. Il a fixé la zone critique de K de 1,8 à 2,0 % sinon 1,9 à 2,2 %. Les zones critiques pour N (3,10%) et (P) de 0,31 à 0,32 % (Tyner, 1946). D'après ces auteurs les résultats de l'analyse foliaire révèlent que la nutrition en P était bonne, celle en N était déficitaire et celle en K était au-dessus du seuil indiqué, ceci indiquerait une consommation indifférente de K.

Tableau 2 : Teneurs des macroéléments et microéléments dans les feuilles

Sites	Trai	Pro (kg)	Macroéléments (%)					Microéléments (ppm)				
			N	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Al
Kimbimbi	T0	10,08	2,129	0,393	2,138	0,884	0,547	10,3	219,5	79,6	16,2	268,4
	T1	14,75	2,103	0,465	2,555	0,975	0,438	10,4	102,6	134,2	5,4	82,3
	T2	12,75	2,334	0,387	2,427	0,904	0,457	12,7	245,6	100,8	10,9	284,1
	T3	11,46	2,115	0,335	2,284	0,866	0,453	10,1	201,1	87,1	7,4	237,7
	T4	12,56	2,078	0,395	2,217	0,723	0,686	8,3	203,7	66,4	7,3	229,9
1 ^{er} cycle Bellevue1	T0	10,16	2,361	0,218	3,200	0,562	0,180	10,0	116,9	51,0	12,9	87,3
	T1	16,03	2,800	0,436	3,166	0,735	0,208	15,0	157,5	91,2	14,5	108,6
	T2	13,66	2,495	0,264	3,592	0,493	0,183	10,4	158,4	44,5	16,2	188,1
	T3	11,66	2,372	0,174	2,635	0,667	0,262	9,3	117,7	43,1	23,8	105,5
	T4	12,90	1,984	0,202	3,189	0,462	0,190	8,4	88,2	34,1	26,3	71,9
2 ^{ème} cycle	T0	08,16	2,156	0,223	2,217	0,628	0,158	7,1	90,0	44,0	7,7	79,5

Mankoussou et al., J. Appl. Biosci. 2017 Influence du potassium dans la production du maïs (*Zea mays* L. variété *Espoir*) dans la vallée du Niari (Congo).

<i>Bellevue</i>	T1	12,32	2,363	0,298	2,247	0,664	0,212	10,1	100,5	37,5	16,1	81,6
	T2	10,07	2,181	0,291	2,406	0,669	0,269	9,1	89,7	45,9	20,5	81,3
	T3	09,50	2,374	0,376	2,258	0,746	0,257	11,0	139,3	64,1	19,4	144,1
	T4	10,28	2,190	0,335	2,785	0,691	0,205	8,2	158,9	40,4	16,0	106,3
Moyenne		12,44	2,269	0,319	2,621	0,711	0,314	10,0	146,0	64,3	14,7	143,8
Écart- type		± 2,11	± 0,20	± 0,08	± 0,45	± 0,14	± 0,16	± 1,92	± 51,70	± 28,87	± 6,22	± 76,33

Analyse de la matrice de corrélation : La matrice de corrélation est consignée dans le Tableau 3. La matrice donne les corrélations des composantes de croissance végétatives et de production, et des tenures en macroéléments et microéléments des feuilles. Le seuil de signification < 0,05 a été retenu pour sélectionner les variables expliquant mieux la variation du PEC. La matrice a montré, à l'exception de la HIE (- 0,08), que toutes les composantes de croissance et de production étaient fortement corrélées au PEC, au seuil de significatif ($p < 0,01$): BT(0,85), BR (0,82), DPF(0,73),

NPPE (0,73), NER (0,64), HPF(0,63). Pour les macroéléments, K était le seul qui s'est corrélié au PEC (0,46) au seuil significatif ($p < 0,05$). Le K était également le seul macroélément qui s'est corrélié positivement aux composantes de croissance : HPF(0,57), BT(0,69) et BR (0,72) au seuil significatif ($p < 0,01$). Ces composantes de croissance étaient corrélées au PEC au seuil de significatif ($p < 0,01$). En ce qui concerne les oligo-éléments, le Cu est le seul qui s'est corrélié avec PEC (0,61) au seuil significatif ($p < 0,01$).

Table 3 : Matrice de corrélation des variables étudiées

Var	PEC	HPF	HIE	DPF	BT	BR	NER	NPP	N	P	K	Ca	Mg	Cu		Fe	Mn	Zn	Al
PEC	1																		
HPF	0,63	1																	
HIE	- 0,08	0,58	1																
DPF	0,73	0,89	0,44	1															
BT	0,85	0,79	0,08	0,83	1														
BR	0,82	0,74	0,11	0,77	0,96	1													
NER	0,64	0,08	- 0,70	0,24	0,59	0,54	1												
NPP	0,73	0,69	0,08	0,78	0,79	0,71	0,49	1											
N	0,39	0,46	0,31	0,41	0,44	0,52	0,00	0,47	1										
P	0,41	0,00	- 0,38	0,15	0,19	0,08	0,37	0,42	0,11	1									
K	0,46	0,57	0,27	0,45	0,69	0,72	0,18	0,28	0,43	- 0,31	1								
Ca	0,14	- 0,34	- 0,59	- 0,13	- 0,12	- 0,17	0,35	0,08	- 0,12	0,78	- 0,61	1							
Mg	0,13	- 0,45	- 0,83	- 0,27	- 0,12	- 0,19	0,61	0,04	- 0,41	0,59	- 0,55	0,67	1						
Cu	0,61	0,40	- 0,12	0,45	0,59	0,56	0,40	0,68	0,75	0,54	0,23	0,37	0,04	1					
Fe	0,13	- 0,37	- 0,76	- 0,26	- 0,01	- 0,07	0,56	0,23	0,06	0,51	- 0,21	0,52	0,68	0,38	1				
Mn	0,47	- 0,06	- 0,59	0,10	0,29	0,25	0,58	0,31	0,04	0,80	- 0,21	0,86	0,57	0,56	0,43	1			
Zn	- 0,09	0,31	0,48	0,17	0,09	0,04	- 0,22	- 0,05	0,12	- 0,51	0,32	- 0,55	- 0,48	- 0,06	- 0,35	- 0,61	1		
Al	0,04	- 0,53	- 0,85	- 0,43	- 0,14	- 0,19	0,57	0,09	- 0,07	0,41	- 0,29	0,49	0,73	0,26	0,95	0,39	- 0,32	1	

Effets des traitements sur les composantes de croissance végétative et de rendement : Les moyennes des valeurs obtenues sur les accroissements de BT, HPF, HIE, DPF, PEC, NER et NPPER sont consignées dans le tableau 4. L'accroissement de la BT a varié entre 24,9 (T3) et 42,4 kg(T1). L'analyse de la variance révèle des différences significatives ($p < 0,05$) entre moyennes obtenues avec les traitements. La classification du test de Newman-Keuls a abouti à deux groupes. T0, T2, T3 et T4 qui ont eu des effets les plus faibles sur l'accroissement de la BT, statistiquement différents de T1. Les accroissements de la HPF et HIE ont oscillé respectivement entre 1,944(T3) et 2,365m(T1) et 0,978 (T0) et 1,207 m (T1). Les analyses de la variance révèlent que des différences significatives ($p < 0,05$) entre moyennes obtenues avec les traitements ont été observées. Les classifications du test de Newman-Keuls ont abouti à deux groupes. Il s'agit T0, T2 et T3 qui ont eu des effets les plus faibles sur la HPF statistiquement différents de T1. Pour T4, il n'existe pas de différence significative ($p < 0,05$) entre sa moyenne et celle de T1 d'une part, et d'autre part avec celles T0, T2 et T3. L'accroissement DPF a varié entre 1,898(T2) et 2,465(T1) cm. L'analyse de la variance révèle que des différences significatives ($p < 0,05$) entre moyennes obtenues avec les traitements ont été observées. La classification selon le test de Newman-Keuls a abouti à trois groupes. Il s'agit de T1 qui a eu

un effet plus bénéfique sur la DPF, statistiquement différent d'autres traitements. T2 et T3 ont eu des effets les plus faibles sur la DPF statistiquement différents de T4. Pour T0, il n'existe pas de différence significative ($p < 0,05$) entre sa moyenne et celle de T4 d'une part, et d'autre part, avec celles des T2 et T3. Les moyennes du PEC ont varié entre 10,13 (T0) et 15,38 kg (T1). L'analyse de la variance révèle que des différences significatives ($p < 0,05$) entre moyennes obtenues avec les traitements ont été observées. La classification du test de Newman-Keuls a abouti à trois groupes. Il s'agit de T1 qui a eu un effet plus bénéfique sur l'augmentation du PEC statistiquement différent des autres traitements. Par contre, T0 a eu un effet faible sur l'accroissement du PEC est statistiquement différent des T2, T3 et T4. Les moyennes du NPPER ont oscillé entre 6,38 (T3) et 15,33 (T1). L'analyse de la variance montre des différences significatives ($p < 0,05$) entre les moyennes obtenues avec les différents traitements. La classification du test de Newman-Keuls a abouti à trois groupes. Il s'agit de T1 qui a eu un effet plus bénéfique sur l'accroissement du NPPER statistiquement différent des T0, T2, T3. Pour T4, il n'existe pas de différence significative ($p < 0,05$) entre sa moyenne et celle de T1 d'une part, et d'autre part, avec celles des T0, T2 et T3. Les moyennes NER ont varié entre 98,8 (T3) et 112,5 (T1). L'analyse de la variance révèle qu'il n'existe pas de différence significative ($p < 0,05$) entre les différents traitements.

Tableau 4 : Effets des différents traitements d'engrais sur la croissance végétative et le rendement

Traitement	composantes de croissance végétative				composante de rendement		
	BT (kg)	HPF (m)	HIE (m)	DPF (cm)	PEC (kg)	NER	NPPE
T0	26,27 b	1,933 b	0,995 b	1,952 bc	10,13 c	97,0 a	7,000 b
T1	42,37 a	2,365 a	1,207 a	2,465 a	15,38 a	112,5 a	15,333 a
T2	28,55 b	2,012 b	0,978 b	1,898 c	13,20 b	104,2 a	8,667 b
T3	24,90 b	1,935 b	1,047 b	1,963 c	11,55 b	98,8 a	6,833 b
T4	32,60 b	2,177 ab	1,122 ab	2,152 b	12,73 b	109,2 a	11,167 ab
CV	10,7	2,2	2,9	2,7	3,6	4,7	18,6
F	0,002	0,008	0,010	< 0,001	< 0,001	0,540	0,010

BT : Biomasse totale à la récolte ; HPF : Hauteur de la plante à la floraison ; HIE : Hauteur d'insertion de l'épi ; DPF : Diamètre de la plante à la floraison. PEC : poids des épis au champ ; BT : biomasse totale ; NER : nombre d'épis récoltés et NPPE : nombre des plantes de plus de deux épis. T₀, T₁ ; T₂ ; T₃ et T₄ sont les traitements appliqués. Les valeurs suivies de la même lettre dans la même colonne ne sont pas statistiquement différentes, au seuil de 0,05 par le test de Newman et Keuls.

DISCUSSION

En observant le tableau 1, les rapports C/N de sols étaient compris entre 10,25 et 14,36, indiquent une vitesse de minéralisation normale de la matière organique (Arrouays et al., 2003 ; Palla et al., 2009), qui conduit à une baisse du taux de carbone. Les

rapports du N/P₂O₅ compris entre 0,15 et 0,41 révèlent que les sols sont bien pourvus en P₂O₅, mais seraient déficients en N (Boyer, 1982). Les pH eau compris entre 5,5 et 6,9 indiqueraient que ce sont des sols ferrallitiques désaturés décrits par Djondo (1994).

D'après cet auteur, les sols présentent une tendance naturelle à s'acidifier et la garniture cationique du complexe présente des risques élevés de toxicité manganique. Comme le rapportait Boyer (1982) l'acidité et la teneur élevée Al^{3+} du sol agissent en synergie avec le Mn^{2+} et devient le premier facteur à suspecter en cas de fortes baisses de récolte ou d'accidents végétatifs dans les sols acides. L'analyse de sols a révélé que la teneur en potassium échangeable est très faible (0,14 à 0,30 mé/100g). En outre, le rapport Ca^{2+}/K^+ (24,58 et 57,87) a montré un déséquilibre en faveur du Ca^{2+} . En effet, Martin (1979) a fixé la valeur minimale de ce rapport à 4 et le bon équilibre se situerait entre 6 et 12. De même la balance cationique $K^+ \times 100 / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+)$ se situait entre 1,55 et 3,60. Ces résultats montrent que le complexe absorbant serait déficient en K^+ , comme l'indiquaient Martin (1975) ; Mapangui (1992) et Djondo (1994). La carence du sol en K se traduit chez le maïs par la diminution de la photosynthèse nette, la conductance stomatique et la concentration sus stomacale en CO_2 (Bednarz *et al.* 1998) et la réduction de l'efficacité photosynthétique (Terry *et al.* 1973). L'application d'engrais avec des doses optimales est considérée comme l'un des principaux facteurs qui peut améliorer la production agricole (Ali *et al.* 2012). Le potassium est l'un de ces trois éléments nutritifs de base (NPK) absorbé par les plantes en quantités plus importantes (Krauss, 1997) et la demande de cet élément est particulièrement importante en phase de croissance rapide (Loué, 1980). L'analyse foliaire a révélé que la nutrition potassique était bonne avec une consommation indifférente. Par contre, celles en azote et en zinc étaient déficientes. Plusieurs études ont rapporté que les consommations de luxe pour le K sont fréquentes et rares pour le P, n'entraînant jamais de toxicité mesurable (Bosc, 1988 ; Boniface *et al.* 1988). La consommation indifférente en K serait due par le fait que le coefficient réel d'utilisation des engrais potassiques est généralement supérieur à celui des engrais phosphatés (Fardeau *et al.*, 1984). L'application des traitements a démontré une amélioration significative aussi des composantes végétatives que de rendement plus à T0. L'application de T1 a entraîné une production moyenne de PEC (15,38 kg) soit en maïs grain de 5,76 t ha⁻¹, suivi de T2 et T4, alors que les attributs minimums ont été enregistrés avec le traitement T0. Les traits les plus élevés de croissance et de rendement de maïs grain sous l'application des T1, T2 et T4 seraient probablement attribués à l'amélioration des propriétés

du sol, à la disponibilité optimale et à l'absorption des nutriments nécessaires à concentration optimale. Comme les montrent les bonnes teneurs foliaires des T1, T2 et T4 en potassium du tableau 3 et les fortes corrélations positives et significatives observées entre le potassium et les composantes de croissance HPF (0,57), BT (0,69) et BR (0,72) du tableau 4. La forte concentration en K^+ contribue conséquemment à l'élévation de taux de transpiration (Jayasekara *et al.*, 1991 - 1993) et de la conductance stomatique (Egilla *et al.* (2005). En effet, le K_2O contenu notamment dans les calcaire, fumiers de poules et matière organique, libéré dans le sol aurait probablement joué plusieurs rôles notamment d'équilibre cationique-anionique de la plante, a contribué de façon majeure au maintien du potentiel osmotique, a stabilisé le pH (Whiterhead, 2000), a intervenu dans le transport des photosynthétats jusqu'aux feuilles et s'est impliqué dans le chargement du phloème (Marschner, 1995) ainsi que dans l'activation de plusieurs réactions enzymatiques dont celles intervenant dans la synthèse protéique (Blevins, 1985; Evans *al.*, 1971). Comme l'avait rapporté Hamza (2003) le potassium améliore les propriétés physiques des sols en stabilisant le pH. Maqsood (2009) notait que la réponse de croissance de maïs en termes de hauteur de la plante et la biomasse totale à l'application de potassium varie considérablement par rapport à T0. Le constat est que les traitements T1, T2 et T4 ont amélioré les composantes de croissance et de rendement de maïs grain. La comparaison entre T1, T2 et T4 montre que T1 induit une croissance plus élevée de DPF qui constitue un excellent indicateur de développement végétatif. Ce paramètre a été amélioré de plus de 26,28 % par T1 par rapport au T0, avec seulement environ de 2,76 ; 10,24 % respectivement pour T2 et T4. Cette tendance évolutive est également observée sur les autres paramètres de croissance tels que la BT (61,28 %), la HPF (22,34 %). T1 apparaît comme une excellente fumure pour la croissance du maïs. En ce qui concerne les paramètres de production, T1 a induit une croissance plus élevée du PEC de plus de 52,34 % par rapport T0, avec seulement environ 30,30; et 25,66 % respectivement pour T2, et T4. Cette tendance évolutive est aussi observée sur les autres paramètres de production tels que le NER (15,97 %) et NPPE (119 %). Les résultats montrent qu'il y a une bonne réponse de maïs au T1. La bonne performance de T1 par rapport à T2 et T4 serait due à sa richesse en K^+ libérés plus le NPK et l'Urée qui auraient probablement stimulés le développement et l'activité racinaire,

favorisant ainsi l'exportation des autres éléments minéraux et la croissance des plantes (Stevenson, 1986). Comme le rapportait Ritchie *et al.*, (1993) que des quantités relativement faibles d'engrais sont nécessaires pendant les premiers stades de la croissance des plantes, mais une forte concentration de nutriments dans la zone des racines à cette époque sont bénéfiques dans la promotion de la croissance précoce. Les faibles résultats enregistrés par T0 sur les composantes de croissance et de rendement, confirme que le sol expérimental est peu fertile. La faible fertilité n'a pas permis à la variété *Espoir*, bien qu'adaptée

dans le milieu, d'exprimer ses potentialités (Violic, 2002 et Pixley, 2003). Les faibles résultats seraient attribuables aux caractéristiques de sols : pH acide et déficiences en nutriments particulièrement le K. Comme l'affirmait Deblay (2006) il serait probablement que sur les parcelles T0, l'absence du chaulage, des fertilisants organiques et minéraux s'était accompagné d'une perte en matière organique et en nutriments, d'une acidification du sol, d'une réduction de la biomasse et de l'activité microbienne, d'une insolubilité du potassium qui ensemble contribuent à la baisse sensible des rendements des cultures.

CONCLUSION

Les résultats obtenus permettent de dire que les sols des parcelles d'essai étaient acides, de faibles teneurs en potassium échangeable (0,14 à 0,30 mé /100g) et déficients en azote ($N/P_2O_5 < 2$). Les teneurs moyennes foliaires en potassium de 2,621 % étaient bonnes et traduisent le bon niveau en potassium échangeables qui devrait être recherché dans les sols de la vallée du Niari en culture du maïs (*Zea mays* L.). Les différents traitements ont influencé positivement et significativement ($P < 0,05$) les composantes de croissance végétative et de rendement de maïs grains. L'application du traitement T1 a produit des valeurs

maximales pour tous les traits étudiés, le rendement en maïs grain particulièrement de 5,76 t ha⁻¹, suivi des traitements T2 et T4 avec des rendements respectifs en maïs grain 4,95 et 4,77 t ha⁻¹. Les faibles résultats enregistrés par T0 seraient attribués aux caractéristiques de sols : pH acide et déficience en potassium. T1 se révéla être la fumure susceptible d'améliorer significativement les composantes végétatives et de rendement du maïs grain par rapport aux autres traitements (T0, T2, T3 et T4) dans la vallée du Niari.

REMERCIEMENTS

Au titre de ce travail, les auteurs tiennent à remercier Dr Nzila J de D, Dr Mbani Grégoire, Dr. Mvoumbou Matoumouna, Dr Mvila A et Dr Ibalá Nzamba A pour l'appui technique. Nous remercions aussi les staffs techniques du laboratoire du Centre de Recherche sur la Conservation et la Restauration des Terres (CRCRT) et du Centre de Recherche et d'Initiation des Projets de Technologique (CRIPT) pour l'appui apporté dans la préparation des échantillons des sols et des feuilles

envoyés au CIRAD –Montpellier (France). Nos remerciements vont à M Moussiessé et M Ballon C et les équipes techniques de culture de maïs de la SARIS Congo et de l'IPHD pour la collaboration. Nos remerciements vont également aux Membres du Groupement pour l'Étude et la Conservation de la Biodiversité pour le Développement (GECOBIDE), pour leur collaboration à l'installation et au suivi de l'expérimentation en plein champ.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ali, S., Sahiba, MA Malik, F. Hassan et M. Ansar. 2012. La croissance du maïs pluvial de fourrage sous différents niveaux d'azote et de phosphore. *Pakistan J. Agric. Res*, 25 (3): 196-205.
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L, Bodineau G., Ratié C., Saby N. & Grolleau E., 2003, Le réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) de France, *Et. Gestion Sols*, 10, 4, 241-250.
- Bednarz CW, DM Oosterhuis, 1998 - Feuille photosynthèse et carbone isotopes discrimination du coton en réponse à une carence en potassium. *Environ. Exp. Bot*, 39: 131-139.
- Blevins, DG, 1985 - Rôle du potassium dans le métabolisme des protéines des plantes. Dans: *Munson RD (Ed) de potassium en agriculture. ASA, et SSSA CSSA; pp: 231-233.*
- Boniface, R. et Trocmé, S. 1988. Enseignements fournis par des essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique. 2 essais sur la fumure phosphatée. In: Gachon (ed). Phosphore et potassium dans les relations sol-

- plante. Conséquence sur la fertilisation. pp 279-402. INRA, Paris
- Boyer, J., 1982- Les sols ferrallitiques, Tome 10 : Facteurs de fertilités et utilisation des sols. Coll. Initiations –Documentations techniques, ORSTOM, Paris, 384 p.
- Bosc, M. 1988 - Enseignements fournis par des essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique. 3 essais sur la fumure potassique. Dans Gachon (éd). Phosphore et potassium dans les relations sol-plante. Conséquences sur la fertilisation. pp 409-466. INRA, Paris.
- Bossono, R. 1981 – Reconnaissance de sols, au sud de Nkayi (Vallée du Niari), recherche de terre adaptées à la culture d'arachide, ORSTOM, Centre de Brazzaville, *Huilka-Nkayi*. 3-13p.
- Braun, H. et RN Roy, 1983. Nutrition des plantes et utilisation rationnelle des engrais pour accroître la production des cultures ; 7^{ème} session de la Commission régionale sur les terres et l'utilisation de l'eau dans le Proche-Orient, 16-18 Mars 1983, FAO, Rome, Italie.
- Denis B. et Rieffel J.M, 1975. Notice explicative n°60. Carte pédologique Madingou République populaire du Congo à 1/200.000 ORSTOM. Paris, 152p,
- Deblay S., 2006- Fertilisation et amendement. Educagri éditions, 2^{ème} Edition, Paris, 129p.
- Fardeau, J.C., Morel, C. et Oberson, A. 1984. Utilisation d'un engrais potassique. Utilisation du 40K. Agronomie, 4 : 663-669
- Djondo M. Y., 1994. Propriétés d'échange ionique de sols ferrallitiques argileux de la Vallée du Niari et Sableux du Plateau Batéké au Congo, Application à la correction de leur acidité, Thèse de Doctorat. Université Paris XII-Val de Marne,
- Egilla JN, FT Davies, TW Boutton 2005. Le stress sécheresse influence du contenu de la feuille en eau, la photosynthèse, et l'efficacité d'utilisation de l'eau des *Hibiscus rosa-sinensis* à trois concentrations de potassium. *Photosynthetica*, 43: 135-140.
- Evans, HJ et RA Wildes, 1971. Potassium et son rôle dans l'activation de l'enzyme, dans: Potassium en biochimie et physiologie. Institut International Potash, Berne, Suisse.
- FAOSTAT 2013. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.
- Fardeau, J.C., Morel, C. et Oberson, A. 1984. Utilisation d'un engrais potassique. Utilisation du 40K. Agronomie, 4 : 663-669
- Hamza MA, WK Anderson, 2003 - Réponses des propriétés du sol et le rendement des céréales au labour profond et l'application de gypse dans un sol compacté de sable limoneux contraste avec un sol sableux limoneux, argileux en Australie-Occidentale. *Aust. J. Agr. Res*, 54: 273282. Violic A.D., 2002. Gestion intégrée de la culture. In : FAO, ed. *Le maïs en zones tropicales : amélioration et production*. Rome : FAO, 251-299.
- HanwayJJ (1962) la croissance du maïs et de la composition par rapport à la fertilité des sols: III. Les pourcentages de N, P et K dans une partie de plante différente par rapport à l'étape de la croissance. *Agron J* 54: 222-229
- IPHD: International Partnership for Human Development, 2013 - Rapports d'activités 2013 – 2014.
- Jayasekara C., RG Mudalige, CS Ranasinghe, 1991-1993 - Effet de N, K, Cl sur la photosynthèse et les relations de l'eau dans les grands semis ouverts (typica) de noix de coco pollinisés. *COCOS*, 9: 30-39.
- Krauss, A., 1997- Potassium, le nutriment oublié en Asie occidentale et en Afrique du Nord: Réalisations et défis futurs dans la recherche sur la fertilité des sols et des terres arides dans la région méditerranéenne. J. Rayan (Ed.), ICARDA, Syrie, pp: 9-21.
- Loué A., 1980. Le potassium et le maïs, au service de l'agriculture, I.N.A, Département d'Agronomie de la SCPA-Mulhouse., 11- 45p
- Loué A., 1984. Méthode de contrôle de la nutrition minérale du maïs. In : Martin-Prevel P., Gagnard J. Et Gautier P. l'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Paris : Editions Tec et Doc-Lavoisier, 598-631.
- Mapangui A., 1992. Étude de l'organisation et du comportement de sols ferrallitiques argileux de la Vallée du Niari. Conséquences sur l'évolution physique sous culture de manioc en mécanisé depuis 15 ans. Thèse Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 246p.
- Maqsood, T. 2009. Réponse du maïs (*Zea mays* L.) à la salinité et le potassium approvisionnement. Ph. D Dissertation, Dept. Soil Science, Institute of Soil & Environmental Sciences,

- Université de l'Agriculture, Faisalabad, Pakistan. Mortvedt, J. 2011.
- Martin D., 1975. Complexe agro-industriel de Mantsoumba : étude pédologique de la ferme de Mantsoumba. Doc. ORSTOM, Brazzaville, 40p
- Martin, D., 1979. Fertilité chimique des sols d'une ferme du Congo. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol*, XVII(1) : 47-64.
- Marschner, H., 1986. Nutrition minérale des plantes supérieures. *Academic Press Inc. San Diego, Etats-Unis*, pp: 148-173.
- Marschner H., 1995. Nutrition minérale des plantes supérieures. 2e éd., *Academic Press, New York, USA*.
- Nzila J. de D., 1986. Étude expérimentale de l'effet des amendements calciques sur un sol ferrallitique acide de la vallée du Niari (Congo). Mémoire DEA fédéral de Pédologie, *INA Paris-Grignon*, 83p.
- Pallo F.J.P., Sawadogo N., Zombre N.P. & Sedogo P.M., 2009 - Statut de la matière organique des sols de la zone nord soudanienne au Burkina Faso, *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **13**, 1, 139-142.
- Pixley K.V., 2003. *The development and promotion of quality protein maize in Sub-Saharan Africa. Progress report 2003*. Harare: CIMMYT.
- Ritchie, WS, John, J. Hanway, Garreno, B., 1993. Comment gland plante se développent. Rapport spécial n ° 48, Iowa State Univ. de la science et de la technologie, Cooperative Extension Service.
- Roshani GA, G. Narayanasamy 2010 - Effets du potassium sur la croissance temporelle des racines et des pousses de blé et de son absorption dans différents sols. *Int. Plant J. Prod.*, **4**: 25-32.
- Société Agricole de Raffinage Industriel du Sucre (SARIS) 2012 - Rapport d'activités culture de maïs.
- Société Française de Réalisation, d'Étude et Conseil (Sofreco-Cerape) 2012 - Étude du secteur agricole- République du Congo.
- Stevenson, J.F. 1986. Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. John Wiley & Sons, New York
- Terry N., A. Ulrich, 1973 - Effets de la carence en potassium sur la photosynthèse et la respiration des feuilles de betteraves à sucre. *Plant J. Physiol*, **51**: 783-786.
- Tyner E.H., 1946. The relation of corn yields to leaf nitrogen, phosphorus and potassium content. *Soil Sci. Amer. Proc*: 317 – 323.
- Violic A.D., 2002. Gestion intégrée de la culture. In : FAO, ed. *Le maïs en zones tropicales : amélioration et production*. Rome : FAO, 251-299.
- Whiterhead, D.C.2000. Nutrient elements in grassland: Soil-Plant-Animal relationships. CABI Publishing, Wallingford UK. 369p