

Influence combinée des fumures organique et minerale sur la nutrition et le rendement du maïs: impact sur le diagnostic des carences du sol

K.P. Akanza ^{1*}, S. Sanogo¹ & H.A. N'Da¹

Keywords: Manure- Mineral fertilizers- Deficiencies- Nutrition- Yield - *Zea mays*- Ivory Coast

Résumé

Un essai a été conduit à la station du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) de Man pour étudier les effets d'apports combinés d'engrais et de fumier sur la fertilité du sol, la nutrition et le rendement du maïs (Zea mays). Trois doses d'engrais et cinq quantités de fumier ont été testées. La combinaison des niveaux des facteurs correspond à quinze traitements. Les résultats montrent que le fumier est le moteur de l'amélioration de la fertilité du sol, de la nutrition et des rendements. L'ensemble des caractéristiques chimiques du sol a été amélioré, notamment, le phosphore, le calcium et la somme des cations basiques échangeables. Des répercussions de cette amélioration de la fertilité du sol sur la nutrition et le rendement ont été établies. Un accroissement significatif de l'assimilation du phosphore et du rendement, imputable au fumier, est observé. La nutrition phosphorée et le rendement du maïs sont liés à la dose de chacun des éléments nutritifs décisifs du sol par une fonction de production quadratique. L'ignorance des facteurs limitant la nutrition et la production entretient la persistance de faibles rendements. La correction des carences par une formule de fumure, ajustée au sol et à la culture, rétablit la productivité. L'entretien organique du sol constitue une solution appropriée aux problèmes du paysan.

Summary

Combined Influence of Manure and Fertilizers on Nutrition and Yield of Maize (*Zea mays*): Impact on the Diagnosis of Primary Soil Deficiencies

A trial was carried out at Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) station in Man, in order to study the effects of combined application of fertilizers and manure on the soil fertility, yields and nutrition of corn (Zea mays). Three doses of fertilizers and five amounts of manure were tested. Combination of levels' factors corresponds to fifteen treatments. Results show that manure is the engine of the improvement of soil fertility, nutrition and yields. All chemical characteristics of the soil have been improved, notably phosphorus, calcium and the total of exchangeable base cations. Impacts of these changes on soil' fertility, plant nutrition and performance have been established. A significant increase in the absorption of phosphorus and yield, due to manure, is observed. Soil phosphoric nutrition and yield of maize are related to the dose in the soil of each of these crucial nutrients by a quadratic production function. The ignorance of factors, that limit nutrition and production, maintains a low yield levels. Correction of deficiencies by a fertilization formula, adjusted to the soil and crop, restores productivity. Organic soil maintenance is an appropriate solution to the problems of the farmer.

¹Centre National de Recherche Agronomique, Abidjan, Côte d'Ivoire

*Auteur correspondant: Email: paul.akanza@yahoo.com

Reçu le 09.03.2015 et accepté pour publication le 22.07.15

Introduction

La dégradation des sols est reconnue comme l'un des problèmes cruciaux auxquels l'Afrique est confrontée (5). Dans les systèmes de culture à base de céréales, prédominant en Afrique, la fertilisation minérale seule ne permet pas de maintenir le niveau de fertilité des sols (3, 6). Le riz (*Oryza sativa* L.) et le maïs (*Zea mays* L.), qui constituent les céréales les plus consommées, à hauteur de 85 kg/pers/an, dans les pays de l'Afrique côtière, occupent des places de choix dans les systèmes culturaux (4). L'accroissement spectaculaire des productions vivrières en Côte d'Ivoire, s'accomplit, sans aucune mutation technologique, au détriment de la forêt (32).

L'apparition fréquente de symptômes de déficiences minérales sur des cultures vivrières dénote de fortes dégradations de la fertilité des sols, entraînant une chute de rendement et le défrichement de nouvelles portions de terre, au détriment de la forêt. Pourtant, l'intérêt d'associer à la fumure minérale des engrais organiques d'origine animale, en vue de maintenir le niveau de fertilité des sols, a été largement démontré (3, 27). Le potentiel de production d'une espèce végétale est conditionné par ses caractères génétiques. Mais les possibilités intrinsèques de production de la plante ne sont pleinement assurées qu'en garantissant au végétal toutes les conditions optimales de sa nutrition (33).

Au stade physiologique de la floraison femelle, la feuille à l'aisselle de laquelle apparaît l'épi principal de maïs, reflète dans sa composition minérale la qualité nutritionnelle dont bénéficie la plante (22, 31). En effet, la culture de maïs, plante exigeante en éléments minéraux, nécessite l'usage de sols fertiles et de bons systèmes de gestion de la fertilité (21). La présente étude vise à évaluer les effets combinés du fumier et des engrais chimiques sur la fertilité du sol, la nutrition minérale et les rendements du maïs, afin d'en déduire des relations fondamentales sol-plante par rapport aux facteurs déterminants du sol ferrallitique.

Matériel et méthodes

Site d'étude

L'essai a été conduit à la station du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) de Man (Côte d'Ivoire). Les coordonnées géographiques du site sont: 7° 33' W, 7° 24' N, 350 m. La saison pluvieuse y dure huit mois (mars-octobre), et la saison sèche, quatre mois (novembre-février). La pluviosité annuelle est de 1.600 mm, faisant apparaître un pic en août. Le sol ferrallitique du site, résultant de l'altération du granite, conformément à la classification française, est peu profond, riche en éléments grossiers. De texture argilo-sableuse, il comporte un horizon humifère peu épais.

Matériel végétal

La variété de maïs (*Zea mays* L.) choisie (F 7928) a un bon potentiel de production. C'est une variété à grains jaunes, d'un cycle de 100 jours (14).

Matériel fertilisant

Le matériel fertilisant comprend l'engrais NPK 10 18 18, la dolomie $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ à 36% de CaO et à 16% de MgO et, enfin, de l'urée à 46% de N.

Matériel organique

Le fumier utilisé est un mélange de déjections de volailles et de litière de balles de riz. Sa composition chimique a été déterminée (Tableau 1). Ce fumier, riche en matière organique (N= 3,42 g.kg⁻¹; C= 30,00 g.kg⁻¹), est bien décomposé (C/N= 8,77). Cette donnée indique que le fumier apporté est un engrais organique (23) dont le potentiel fertilisant s'apprécie à travers les valeurs de la somme des cations basiques (3,18%), des oligo-éléments (Fe= 1.240 mg.kg⁻¹ et Zn= 260 mg.kg⁻¹) et du potentiel hydrogène dévoilant que le fumier est une substance alcaline (pH= 7,9) selon Zoro *et al.* (35). Ce potentiel fertilisant est aussi caractérisé par sa teneur en phosphore (1645 mg.kg⁻¹) moyennement élevée (35).

Tableau 1

Composition chimique du fumier de volaille utilisé comme engrais organique.

pH	C	N	C/N	Pass.	K	Ca	Mg	Na	S	Fe	Zn	Cu
	(g.kg ⁻¹)			(mg.kg ⁻¹)	(%)					(mg.kg ⁻¹)		
7,9	30	3,42	8,77	1645	2,42	0,43	0,16	0,17	3,18	1240	260	8

Pass.= Phosphore assimilable; S= Somme des cations basiques échangeables.

Dispositif expérimental et traitements

L'essai a été conduit selon un dispositif en "split-plot" à quatre répétitions, avec deux facteurs étudiés. Les engrais chimiques forment le facteur principal, à trois niveaux: (a) F0, le témoin; (b) F1, la demi-dose et (c) F2, la dose complète conseillée par la recherche (26). Le fumier constitue le facteur secondaire. Cinq quantités, correspondant aux cinq parcelles élémentaires de chaque sous-bloc, ont été définies: (a) Q0= 00 t.ha⁻¹ témoin; (b) Q1= 05 t.ha⁻¹; (c) Q2= 10 t.ha⁻¹; (d) Q3=15 t.ha⁻¹ et (e) Q4= 20 t.ha⁻¹. Quinze traitements issus de la combinaison des niveaux des facteurs ont été expérimentés.

Collecte des échantillons de sol, de végétaux et analyse statistique des données

Echantillons de sol

Deux prélèvements de terre, de l'horizon superficiel (0-30 cm), ont été effectués par parcelle: le premier, avant les apports des engrais, le deuxième, après la récolte du maïs. Constitués chacun de 60 échantillons composites, ils ont été analysés au laboratoire de l'AfricaRice. Les caractéristiques chimiques des sols ont été définies grâce aux méthodes suivantes:

-cations basiques échangeables: méthode de saturation par une solution d'acétate d'ammonium 1N ajusté à pH= 7; le dosage des cations a été réalisé par absorption atomique et photomètre à flamme;

-phosphore assimilable: déterminé à l'aide du bicarbonate de sodium (NaHCO₃) 0,5M à pH= 8,5.

Echantillons de végétaux

Les prélèvements ont concerné le tiers médian des feuilles à l'aisselle desquelles apparaît l'épi principal de maïs. Ils ont été effectués au stade floraison femelle (19, 20). Le tiers médian retenu de chaque feuille a été débarrassé de sa nervure principale. Les 60 échantillons de feuilles ont été analysés au laboratoire du CNRA à Anguédédou. Après minéralisation de l'échantillon, le dosage de l'azote a été effectué par la méthode Kjeldahl. Quant au phosphore et au potassium, ils ont été dosés, respectivement, par la méthode Olsen-Dabin et par

spectrométrie à flamme.

La méthode d'analyse par spectrométrie d'absorption atomique est utilisée pour le dosage du calcium et du magnésium.

Collecte des données et analyse statistique

Les rendements en grains, exprimés à 15% d'humidité, ont été obtenus à l'issue de la récolte de chacune des parcelles utiles et, la production, ramenée à l'hectare, après séchage. Toutes les données collectées ont été soumises à l'analyse de variance selon le logiciel GenStat (29). La comparaison multiple des moyennes est le résultat du test de Student-Newman-Keuls, appliqué, au seuil de 5 %.

Diagnostic des déficiences minérales du sol

Le rendement d'une culture est lié à la dose de chacun des éléments nutritifs décisifs du sol par une fonction de production quadratique (12, 34) tel que défini dans la formule I.

$$R = R_0 + aX - \beta X^2 + e \quad \text{I}$$

où R représente le rendement de la culture; R_0 , le rendement du témoin absolu T00; a , un coefficient traduisant l'efficacité de l'engrais; β , un coefficient exprimant l'action des facteurs déficients du sol; X , la dose de l'élément considéré et e , les résidus par rapport au modèle.

Résultats et discussion

Caractéristiques chimiques du sol avant l'implantation de l'essai

Les propriétés chimiques du sol, avant la mise en place de l'essai, ont été définies. C'est un sol pauvre en matière organique (N= 1,08 g.kg⁻¹ et C= 10,62 g.kg⁻¹), bien décomposée (C/N= 9,83). Ce sol appartient à la classe des sols ferrallitiques (2, 30). Ses propriétés chimiques témoignent d'un faible potentiel de fixation et d'échange d'éléments, si l'on en juge de la somme des cations basiques échangeables (S= 2,14 cmol(+).kg⁻¹) et du taux de saturation (V= 24,75 %).

Le phosphore assimilable, pour une valeur de P= 16,50 mg.kg⁻¹, indiquant un sol très pauvre (35), manifeste l'une des principales carences minérales de ce sol ferrallitique (11).

Effets du fumier sur la fertilité du sol

Toutes les caractéristiques chimiques du sol se sont avérées significatives au seuil de 5% (1). Cependant, dans le présent article, l'analyse de la fertilité du sol a été surtout focalisée sur trois facteurs décisifs notamment le phosphore assimilable, le calcium échangeable et la somme des cations basiques échangeables qui expliquent, de façon très nette, la nutrition phosphorée et le rendement du maïs dans les sols ferrallitiques de la station CNRA de Man.

Somme des cations basiques échangeables

Les valeurs de la somme des cations basiques échangeables ont oscillé entre 2,14 et 5,04 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ selon les traitements (Tableau 2). Sans engrais minéraux, le fumier a fait varier la somme des cations basiques de 2,51 à 3,73 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tableau 2). Les taux d'augmentation ont été compris entre 17,29 et 74,30%, respectivement, pour 5 et 20 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de cette matière organique. L'application de 20 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de fumier a doublé la valeur de la variable par rapport au témoin T00. Pour les traitements combinant la demi-dose d'engrais chimiques et le fumier, la somme des cations basiques a fluctué entre 2,41 et 5,04 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tableau 2) avec des taux d'accroissement allant de 12,62 à 135,51%, respectivement, pour 5 et 20 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de fumier. Les traitements T08 et T09, ont, respectivement, doublé et triplé la valeur de la somme des cations basiques par rapport à T00. En présence de la dose complète d'engrais chimiques, le fumier a consigné des valeurs variant de 2,67 à 4,08 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tableau 2) soit des taux d'accroissement de 24,77 à 90,65% par rapport au témoin T00, respectivement, pour 5 et 15 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de matière organique. Le traitement T13 a doublé la valeur de la somme des cations basiques. Mais, le plus fort taux de majoration de cette somme des cations basiques (135,51%), par rapport au témoin T00, a été obtenu avec le traitement T09. Les apports conjoints des deux types d'engrais ont permis un net accroissement de la somme des cations basiques échangeables des horizons supérieurs du sol, conformément aux résultats de Boissezon (8).

Calcium échangeable

Les teneurs en calcium du sol ont varié de 1,30 à 4,09 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ suivant les traitements (Tableau 2).

Sans engrais minéraux, le fumier a accru ces teneurs de 1,89 à 2,92 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tableau 2). Les taux d'accroissement, en comparaison avec le témoin T00, vont de 29,45 à 100%, respectivement, pour des quantités de 5 et 20 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de fumier. L'apport de 20 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de fumier a doublé la richesse en calcium du sol par rapport au témoin T00. Associé à la demi-dose d'engrais chimiques, le fumier a fait varier les teneurs en calcium de 1,85 à 4,09 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tableau 2). Les taux de bonification, par rapport à T00, sont compris entre 26,71 et 180%, respectivement, pour des quantités de 5 et 20 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de fumier. L'apport de 20 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de fumier a quasiment triplé la richesse en calcium du sol. Combiné à la dose complète d'engrais chimiques, le fumier a fait osciller les teneurs en cet élément entre 2 et 2,86 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tableau 2), soit des taux d'accroissement de 37 à 96%, respectivement, pour 5 et 15 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de fumier. L'apport de 20 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de cette matière organique (T04) et sa combinaison avec la demi-dose d'engrais chimique (T09) sont les plus propices à la genèse de bonnes conditions de rétention du calcium par le sol ferrallitique. Aussi, les traitements T04 et T09 ont-ils, respectivement, permis de doubler et de tripler la richesse du sol en cet élément par rapport au témoin T00.

Phosphore assimilable

Les effets des traitements sur le phosphore se sont traduits par des valeurs comprises entre 16,50 et 100,75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tableau 2). Sans engrais minéraux, les teneurs en phosphore ont été accrues par le fumier. Mais, pour 5 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$, une teneur de 30,75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ a été acquise, contre 28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ avec 10 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Ce résultat discordant, n'ayant aucun fondement scientifique, pourrait être inscrit au compte d'une éventuelle erreur d'échantillonnage commise par les techniciens lors des prélèvements ou au laboratoire.

Les apports de 15 et 20 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de fumier accèdent à un niveau de teneur identique de 75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tableau 2).

Tableau 2

Effets conjoints des deux types d'engrais sur trois caractéristiques chimiques du sol et taux d'accroissement.

Groupe objets	Traitements expérimentaux	Phosphore assimilable (mg.kg ⁻¹)	Taux P. (%)	Calcium échangeable. cmol(+).kg ⁻¹	Taux Ca (%)	Somme cations cmol(+).kg ⁻¹	Taux S. (%)
1	T00	16,50 c	0	1,46 bc	0	2,14 bc	0
	T01	30,75 de	86,36	1,89 bc	29,45	2,51 bc	17,29
	T02	28,00 de	69,7	2,34 bc	60,27	2,94 bc	37,38
	T03	75,25 abc	356,06	2,55 abc	74,66	3,33 abc	55,61
	T04	75,50 abc	357,58	2,92 abc	100,03	3,73 abc	74,3
2	T05	17,00 e	3,03	1,30 c	-10,96	1,81 c	-15,42
	T06	33,50 de	103,03	1,85 bc	26,71	2,41 bc	12,62
	T07	34,50 de	109,09	1,90 bc	30,14	2,50 bc	16,82
	T08	69,0 abc	318,18	3,21 ab	119,86	4,16 ab	94,39
	T09	100,75 a	510,61	4,09 a	180,14	5,04 a	135,51
3	T10	27,25 de	65,15	2,01 bc	37,67	2,76 bc	28,97
	T11	42,0 cde	154,55	2,00 bc	36,99	2,67 bc	24,77
	T12	58,67 abc	255,58	2,72 abc	86,3	3,68 abc	71,96
	T13	84,50 ab	412,12	2,86 abc	95,89	4,08 ab	90,65
	T14	78,40 abc	375,15	2,56 abc	75,34	3,20 bc	49,53
Moyenne générale		51,5		2,37		3,12	
PPDS 5 %		24,8		1		1,18	
CV %.		33,4		29,35		26,25	

PPDS= Plus petite différence significative; CV= Coefficient de variation; Taux= Taux d'accroissement; Les taux d'accroissement sont calculés par rapport au témoin T00.

Les taux de majoration, par rapport au témoin T00, ont varié de 69,7 à 357,58 %, pour des quantités de 5 à 20 t.ha⁻¹ de fumier. Les traitements combinant la demi-dose d'engrais chimiques avec du fumier ont été les plus performants vis-à-vis de la rétention du phosphore par le sol ferrallitique. Ainsi, les valeurs ont évolué de 33,5 à 100,75 mg.kg⁻¹ (Tableau 2). Les taux de majoration ont été compris entre 103 et 510,61 %, en comparaison avec T00. En présence de la dose vulgarisée d'engrais minéraux, les teneurs en phosphore du sol ont progressé de 42 à 84,5 mg.kg⁻¹ (Tableau 2) pour des taux d'augmentation, par rapport au témoin T00, variant de 154,55 à 412,12%, respectivement, selon 5 et 15 t.ha⁻¹ de fumier. Le plus fort taux d'accroissement (510,61%) a été obtenu grâce au traitement T09. La richesse en phosphore du sol a été nettement améliorée, en d'autres termes, sextuplée par rapport au témoin T00. Le seuil minimum de phosphore Olsen-Dabin, tel que proposé par Latham et al. (16) et Moussa et al. (24), est de 60-70 mg.kg⁻¹.

La synergie des deux types d'engrais certifie bien qu'à Man, le sol a un fort pouvoir d'adsorption vis-à-vis du phosphore (17). Environ 80% des sols tropicaux ne disposent guère de quantités suffisantes de phosphore pour une nutrition satisfaisante des plantes cultivées, si bien que, parmi les facteurs limitants, d'ordre chimique, la carence en phosphore est l'une des plus graves et des plus fréquentes entraves à l'intensification des productions agricoles (7, 24). Les techniques de gestion de la fertilité, fréquemment adoptées par les agriculteurs en Afrique, conduisent inéluctablement à un épuisement rapide des sols (9, 10).

Cette pratique impose la nécessité d'une utilisation plus accrue des apports conjoints d'engrais organiques et minéraux pour compenser les pertes et générer de meilleures conditions de production agricole (9).

Effets du fumier sur la nutrition minérale du maïs

Nutrition phosphorée du maïs

De l'ensemble des variables analysées de nutrition du maïs, seul le phosphore s'est avéré significatif au seuil $\alpha = 5\%$.

Les teneurs en phosphore des feuilles, à l'aisselle desquelles apparait l'épi principal au stade floraison femelle, ont oscillé entre 0,14 et 0,41% MS, en fonction des traitements (Tableau 3). Sans engrais minéraux, les teneurs en phosphore des feuilles ont évolué de 0,23 à 0,33% MS, avec les doses de fumier (Tableau 3). Les taux d'amélioration des teneurs des objets, par rapport à T00, sont passés de 64,29 à 135,71%, pour des apports respectifs de 5 et 20 t.ha⁻¹ de fumier. En présence de la demi-dose d'engrais minéraux, la tendance évolutive des teneurs en phosphore des feuilles, en fonction des quantités de fumier, reste en vigueur. Les concentrations en phosphore ont progressé de 0,22 à 0,38% MS, pour des apports de 5 et 15 t.ha⁻¹ de fumier (Tableau 3). Les taux d'accroissement sont alors passés de 57,14 à 171,43%, par rapport à T00. En présence de la dose complète vulgarisée d'engrais inorganiques, l'aptitude évolutive de la nutrition phosphorée du maïs, en fonction des quantités de matière organique, s'est authentifiée. Les teneurs en phosphore des feuilles sont passées de 0,22 à 0,41% MS, pour des apports de 5 et 20 t.ha⁻¹ de fumier (Tableau 3). Aussi, les taux d'augmentation ont-ils oscillé entre 57,14 et 192,86 %, en comparaison avec T00. Les traitements ont confirmé une très nette hausse de la qualité de la nutrition phosphorée du maïs en fonction des quantités de fumier. Il en résulte que la quantité de 15 t.ha⁻¹ constitue l'optimum de ce facteur.

Effets du fumier sur le rendement du maïs

Le rendement en grains a oscillé entre 2,08 et 6,08 t.ha⁻¹ selon les traitements (Tableau 4). Dans le premier groupe d'objets, où la productivité du sol est régie par le fumier, le rendement a fluctué entre 3,37 et 5,82 t.ha⁻¹, grâce aux apports de 5 et 20 t.ha⁻¹ (Tableau 4). Les taux d'amélioration respectifs sont estimés à 62 et 180%, en comparaison avec T00. Au niveau du deuxième groupe d'objets, où la production est sous la dépendance conjointe de la demi-dose d'engrais chimiques et du fumier, le rendement a progressé de 3,65 à 5,75 t.ha⁻¹ (Tableau 4).

La comparaison avec T00 a permis de déceler des taux d'accroissement passant de 75,45 à 176,53%, respectivement, pour des apports de 5 et 20 t.ha⁻¹ de fumier (Tableau 4). Dans le troisième groupe de traitements, où la production est régie conjointement par la dose vulgarisée d'engrais et le fumier, la tendance à la hausse du rendement, sous l'effet du fumier, reste en vigueur. Aussi le rendement a-t-il varié de 4,32 à 6,08 t.ha⁻¹ (Tableau 4). Les taux d'accroissement ont été compris entre 107,94 et 192,78%, respectivement, pour 5 et 20 t.ha⁻¹ de fumier. Il n'y a eu aucune différence significative de rendement entre les apports de 15 et 20 t.ha⁻¹ de fumier. En conséquence, la dose de 15 t.ha⁻¹ constitue l'optimum de ce facteur.

Les résultats traduisent la prépondérance de la matière organique. Sans engrais chimiques, les apports de 15 à 20 t.ha⁻¹ de fumier ont accru le rendement, respectivement, de 166 à 180% par rapport au témoin T00. Mais cette performance s'est consolidée avec l'application conjointe des deux types de fumure. Un appoint minéral a été essentiel pour rehausser les taux d'augmentation de 190 à 192% en présence de la dose complète d'engrais chimiques. Ce résultat indique que le maïs est sensible aux carences minérales du sol. A ce effet, il est reconnu comme un indicateur fiable d'un manque de minéraux dans le sol (9, 21).

Régression entre le calcium échangeable et la somme des cations basiques échangeables

Le graphique (Figure 1), représentatif de la régression linéaire entre le calcium échangeable et la somme des cations échangeables dans les sols ferrallitiques de la station CNRA, affiche un fort coefficient de détermination positif ($R^2 = 0,99$) qui prouve que les deux variables sont absolument liées et que leurs courbes spécifiques présentent des allures similaires. Le cation dominant dans les sols ferrallitiques étant le calcium (16), bien que la somme des cations basiques soit repérée comme facteur limitant, l'on a choisi la représentation graphique, dans la suite du présent article, du calcium échangeable du fait de sa dominance.

Tableau 3

Effets du fumier sur la nutrition phosphorée du maïs.

Série objets	Traitements expérimentaux	Phosphore (% MS)	Taux accrois. (%)
1	T00	0,14	0
	T01	0,23	64,29
	T02	0,27	92,86
	T03	0,32	128,57
	T04	0,33	135,71
2	T05	0,15	7,14
	T06	0,22	57,14
	T07	0,26	85,71
	T08	0,38	171,43
	T09	0,34	142,86
3	T10	0,18	28,57
	T11	0,22	57,14
	T12	0,23	64,29
	T13	0,33	135,71
	T14	0,41	192,86
Moyenne générale		0,27	
PPDS 5 %		0,06	
CV %.		15,66	

PPDS = Plus petite différence significative ; CV = Coefficient de variation ; aux accrois.= Taux d'accroissement

Les taux d'accroissement son calculés par rapport au témoin T00.

Tableau 4

Effets conjugués des deux types d'engrais sur le rendement du maïs et taux d'accroissement.

Groupe d'objets	Traitements expérimentaux	Rendement du maïs (t.ha ⁻¹)	Taux accrois. (%)
1	T00	2,08 f	0
	T01	3,37 def	62,09
	T02	3,94 cd	89,53
	T03	5,54 ab	116,43
	T04	5,82 a	180,18
2	T05	2,39 ef	14,8
	T06	3,65 de	75,45
	T07	4,31 bcd	107,22
	T08	5,69 ab	174,53
	T09	5,75 ab	176,53
3	T10	3,00 def	44,4
	T11	4,32 bcd	107,94
	T12	5,09 abc	145,13
	T13	6,04 a	190,61
	T14	6,08 a	192,78
Moyenne générale		4,47	
PPDS 5%.		1,29	
CV %.		14,85	

PPDS = Plus petite différence significative ; CV = Coefficient de variation ; aux accrois.= Taux d'accroissement

Les taux d'accroissement son calculés par rapport au témoin T00.

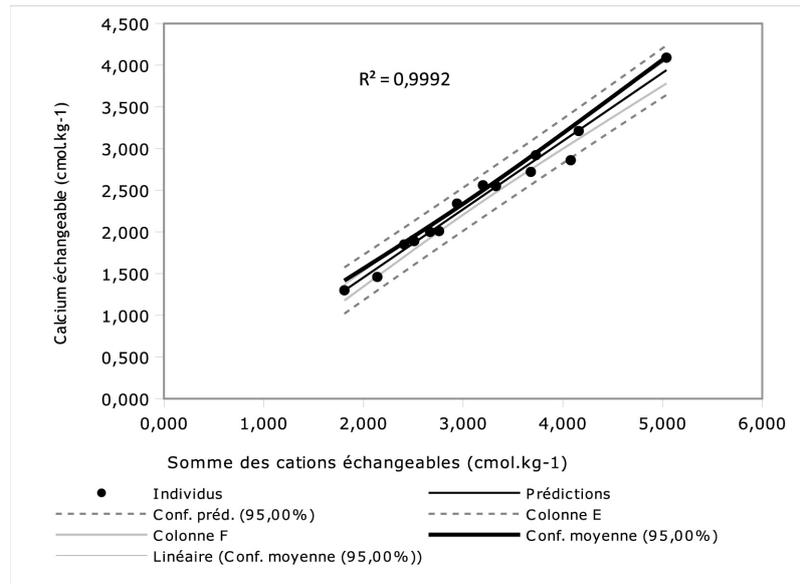


Figure 1: Relation linéaire entre le calcium et la somme des cations basiques dans les sols ferrallitiques de la station CNRA de Man (Côte d'Ivoire).

Diagnostic des carences minérales naturelles du sol

La mise en application du principe de diagnostic des déficiences minérales primaires ou absolues du sol et de l'étude des fonctions de production a permis d'établir des ajustements linéaires et quadratiques significatifs aussi bien pour la nutrition phosphorée que pour le rendement (12, 34).

Diagnostic des carences du sol selon les teneurs en phosphore des feuilles

Le principe du diagnostic des déficiences minérales primaires du sol et de l'étude des fonctions de production ont été appliqués à l'unique variable significative de la nutrition minérale du maïs. Il s'agit de la teneur en phosphore des feuilles, à l'aisselle desquelles apparaît l'épi principal de maïs. Cette variable, dont l'étude a été couplée à celle des données du sol, relate que deux éléments nutritifs du sol ferrallitique, notamment le calcium échangeable et le phosphore assimilable, ont permis d'établir des ajustements linéaires et quadratiques significatifs avec la nutrition phosphorée (12, 34). Les coefficients de détermination affichés (R^2) sont élevés et compris entre 0,72 et 0,77. Ils traduisent que, dans 72 et 77% des cas l'assimilation du

phosphore par le maïs est déterminée, dans les sols ferrallitiques de la station CNRA de Man, respectivement, par le calcium échangeable et le phosphore assimilable. Ces deux variables du sol, qui expliquent parfaitement bien l'assimilation du phosphore par le maïs, constituent des facteurs limitants de la nutrition. Les valeurs de R^2 , représentant les fractions de la variation de la nutrition phosphorée expliquées par la régression, installent le phosphore assimilable au premier rang des facteurs déterminants pour $R^2 = 0,77$ (Figure 2a), suivi par le calcium échangeable avec $R^2 = 0,72$ (Figure 2b). Ces résultats, qui constituent des preuves authentiques, démontrent bien que la nutrition minérale est liée à la dose de chacun des deux éléments nutritifs décisifs du sol par une fonction de production quadratique (12, 34). Le principe du diagnostic des carences ne s'est pas limité au seul rendement mais s'est étendu, dans les conditions de réalisation de cet essai, au phénomène physiologique plus complexe que constitue la nutrition phosphorée. Les carences absolues ou primaires du sol (13, 28) limitent la nutrition minérale des cultures avec des répercussions sur leur pleine expression par rapport au rendement.

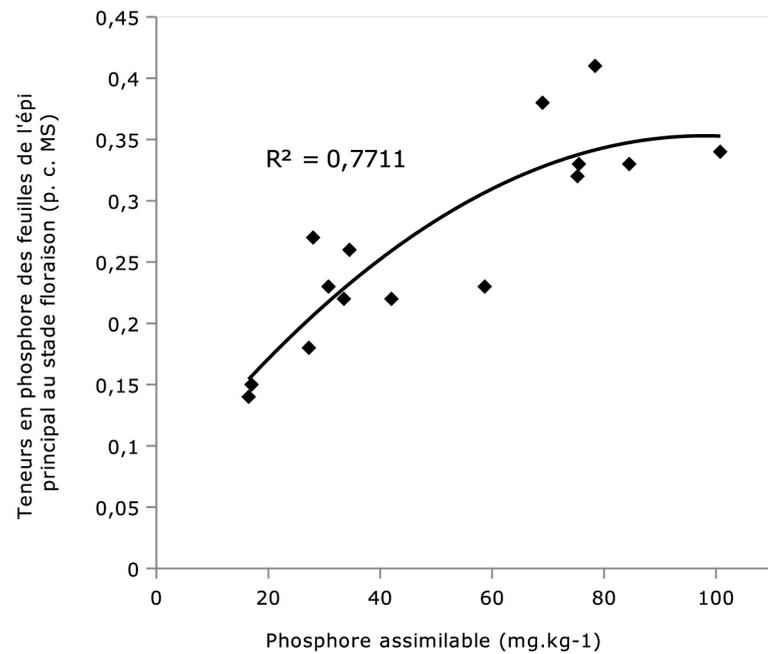


Figure 2a: Modèle d'évolution des teneurs en phosphore, des feuilles de l'épi principal de maïs au stade floraison femelle, en fonction du phosphore assimilable.

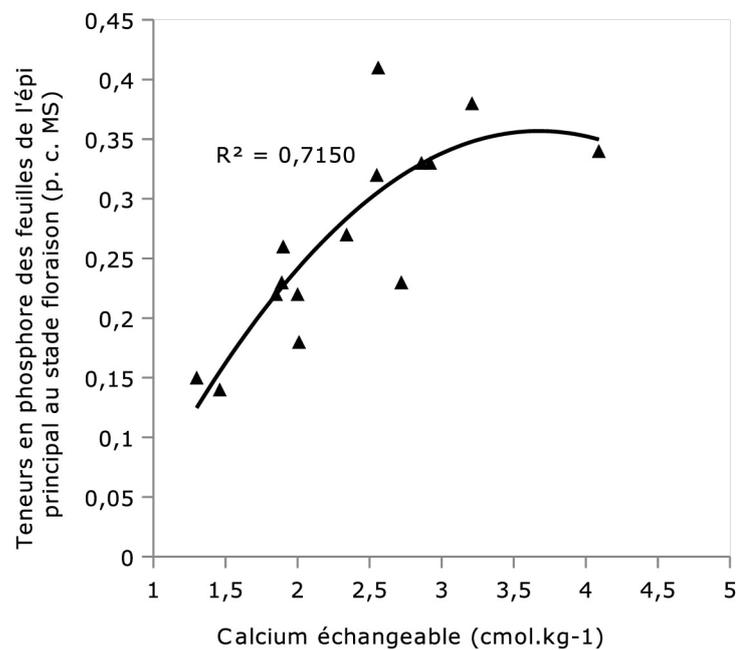


Figure 2b: Modèle d'évolution des teneurs en phosphore, des feuilles de l'épi principal de maïs au stade floraison femelle, en fonction du calcium échangeable.

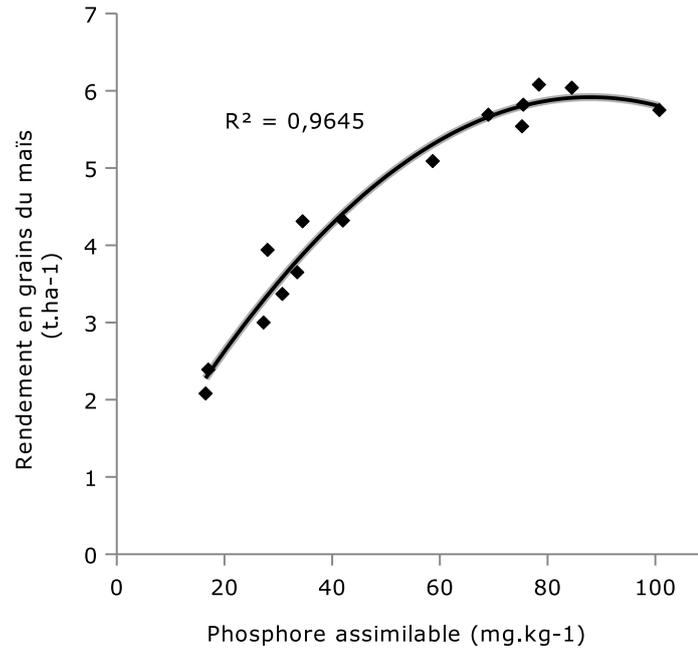


Figure 3a: Modèle d'évolution du rendement en grains du maïs en fonction du phosphore assimilable.

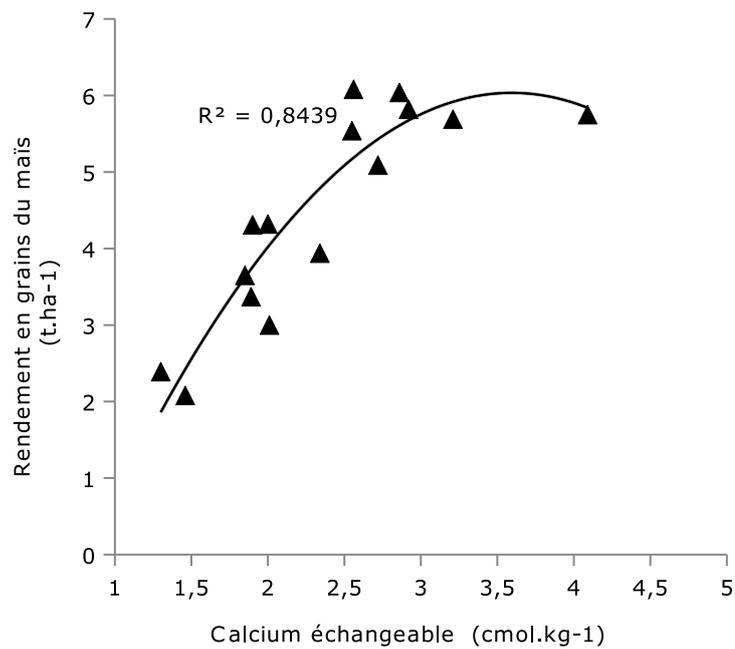


Figure 3b: Modèle d'évolution du rendement en grains du maïs en fonction du calcium échangeable

Diagnostic des carences du sol selon le rendement

A l'instar de la nutrition phosphorée, les fonctions de production établies, selon le rendement, affichent des coefficients de détermination (R^2) plus élevés et compris entre 0,84 et 0,96. Ils interprètent que, dans 84 et 96% des cas, le rendement du maïs est déterminé, respectivement, par le calcium échangeable et le phosphore assimilable. Ces valeurs de R^2 , représentant les fractions de la variation du rendement du maïs expliquées par la régression, classent le phosphore au premier rang des facteurs limitants (Figure 3a). Il est suivi par le calcium échangeable (Figure 3b). A l'étape de l'analyse finale, il apparaît que les résultats obtenus sont plausibles (15). En effet, l'utilisation croisée des données de nutrition phosphorée à celles des analyses de sol d'une part, et de rendement à celles des analyses de sol d'autre part, montre que le plan factoriel utilisé a pleinement joué son rôle en permettant de mettre en évidence les principaux facteurs influents du milieu notamment le phosphore et le calcium optimisant ainsi la réponse attendue (15). Les résultats acquis aussi bien par la nutrition phosphorée que par le rendement sont parfaitement cohérents pour révéler les mêmes facteurs décisifs du sol ferrallitique, dans un ordre nettement harmonieux. D'autres facteurs de l'environnement (climat et fertilité intrinsèque du sol) sont crédités, de 23 à 28% des variations de l'assimilation du phosphore par le maïs, et de 4 à 16% des variations du rendement du maïs (10). Ces résultats corroborent ceux de Barroin (7) et ceux de Ndiaye et Sidibé (25) qui affirment que le phosphore est le nutriment le plus limitant, comparé à l'azote et au carbone. Le phosphore et le calcium étant déjà connus, en zone forestière de Côte d'Ivoire, comme facteurs limitants de la nutrition et de la production, nos résultats corroborent celui de Gigou (11). Dans le sol d'une zone agro pédoclimatique donnée, plusieurs déficiences sont toujours bien établies. La nutrition et la production sont limitées par le facteur le plus éloigné de son optimum conformément à la loi du minimum ou d'interaction (18). Et, tant que la correction du facteur le plus limitant n'est pas réalisée, les actions sur les autres sont peu efficaces (10, 18).

Le fumier, moyennement pourvu en phosphore (1645 mg.kg^{-1}) selon Zoro *et al.* (35), a corrigé la carence du sol ($16,5 \text{ mg.kg}^{-1}$) en cet élément. Dans le cas spécifique de cette carence absolue ou primaire en phosphore du sol ferrallitique de Man, celui-ci reste évidemment pauvre en cet élément. Mais un apport de fumier a permis de lever cette carence. Ce résultat est en accord avec celui de Haddad (13) sur la pomme de terre. Suite à la correction du premier facteur déficient, c'est un autre qui prend sa place (10) précisément le second ou le calcium échangeable dans le cas présent.

Conclusion

Les résultats de cette étude montrent l'intérêt indéniable de combiner des engrais minéraux aux fumures organiques pour améliorer la fertilité des sols, la nutrition minérale et les rendements des cultures vivrières. L'utilisation croisée des données de nutrition à celles du sol d'une part, des données de rendement à celles du sol d'autre part, montre que le plan factoriel utilisé a pleinement joué son rôle en permettant de mettre en évidence les principaux facteurs influents du milieu ou d'optimiser la réponse attendue. L'analyse des fonctions de nutrition phosphorée et de production de la culture de maïs démontre que le phosphore et le calcium expliquent nettement la nutrition et les rendements. Ce sont des facteurs limitants du sol ferrallitique de la région. Dans ces sols ferrallitiques, le principe du diagnostic des facteurs décisifs s'est confirmé. Par ailleurs, la nutrition, un phénomène plus complexe de physiologie, a également authentifié le principe dans les conditions de réalisation de cet essai. La persistance de faibles rendements des cultures, dans les différentes zones agro écologiques du pays, trouve en ce concept une explication cohérente des facteurs déficients, mis en évidence par les fonctions de production du maïs. Elles certifient bien que la réponse des cultures aux apports de fertilisants constitue un acquis incontestable. Les formules de fumure doivent donc être adaptées au sol et à la culture, en corrigeant toutes les déficiences insoupçonnées du milieu. L'apport de 15 t.ha^{-1} de fumier constitue l'optimum de ce facteur.

Cette matière organique combinée aux engrais minéraux, résout les problèmes de chute de teneurs en éléments organiques du sol et de nutrition tout en maintenant des rendements élevés et stables. L'amélioration de la fertilité des sols ferrallitiques et la correction des carences, imputables aux apports combinés des deux types d'engrais, pourraient témoigner d'une gestion durable de la fertilité, de l'amélioration de la nutrition, de l'accroissement des rendements et de la sédentarisation des systèmes de cultures. En conséquence, cette expérience mériterait d'être menée dans d'autres zones agricoles du pays.

References bibliographiques

1. Akanza K.P. & Yoro G., 2003, Effets synergiques des engrais minéraux et de la fumure de volailles dans l'amélioration de la fertilité d'un sol ferrallitique de l'Ouest de la Côte d'Ivoire, *Agron. Afric.*, **15**, 135-144.
2. Anonyme, 1967, *Classification des sols*, Rapport d'exécution DCGTx. Abidjan. 63.
3. Anonyme, 2003, *Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne*, Publication FAO, No 25, Rome. 63.
4. Anonyme, 2011, *Les cultures vivrières pluviales en Afrique de l'Ouest et du Centre, Eléments d'analyse et propositions pour l'action*, AFD - CIRAD - FIDA, Editions La Fertoise. 195.
5. Assié K.H., Angui K.T. & Tamia A.J., 2008, Effets de la mise en culture et des contraintes naturelles sur quelques propriétés physiques d'un sol ferrallitique au Centre Ouest de la Côte d'Ivoire: conséquences sur la dégradation des sols, *Eur. J. Sci. Res.*, **23**, 149-166.
6. Bado B.V., Sédogo P.M., Cescas M.P., Lompo F. & Bationo A., 1997, Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso, *Cah. Agric.*, **6**, 571-575.
7. Barroin J., 2004, Phosphore, azote, carbone...du facteur limitant au facteur de maîtrise. *Courr. Environ.*, INRA, **52**, 1-52.
8. Boissezon P., 1970, Etude du complexe adsorbant des ferralsols forestiers de Côte d'Ivoire, *Cah. ORSTOM, série Pédologie*, **3**, 391-418
9. Diouf A., Diop T.A., Ndiaye M.A.F., Ndiaye A.S. & Gueye M., 2008, Impact de la biomasse de *Gliricidia sepium* utilisée comme engrais vert sur la culture du maïs (*Zea mays*) au Sénégal, *J. Sci.*, **8**, 10-17.
10. Dugué P. & Gigou J., 2002, *La gestion de la fertilité*, pp 601-641, In: *Mémento de l'Agronome*, Editions CIRAD-GRET, Paris, 810.
11. Gigou J., 1987, L'importance de la carence en phosphore pour les cultures annuelles en Côte d'Ivoire, *Agron. Trop.*, **42**, 20-28.
12. Giroux M. & Lemieux M., 2006, Comparaison de différentes méthodes d'évaluation de la fertilité azotée des sols et détermination de la dose N optimale du maïs ensilage. *Agrosolutions*, **17**, 39-50
13. Haddad M., 2014, *La fertilisation de la pomme de terre, Journée fertilisation de la pomme de terre de Djanatu El-Arif (Zawya) du 08/09/2014*. 28. www.ccidahra.com/agrimosta2014. Consulté le 20/02/2015
14. Hainzelin E., 1984, *Variétés de maïs recommandées en Côte d'Ivoire*, Rapport IDESSA/DCV, Ministère de la Recherche Scientifique, Abidjan. 20.
15. Karam S., 2004, *Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt*. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 234.
16. Latham M. & Brookfield H. C., 1983, Iles Fidji orientales. *Etude du milieu naturel et de son évolution sous l'influence humaine*. Rapport général n° 3 du projet UNESCO/FNUAP. Travaux et documents de l'ORSTOM n° 162, Paris, 194 p.

17. Le Buanec B. & Saint-Amand R. D., 1975, *Mise en évidence d'une carence en phosphore sur sols dérivés de granites en Côte d'Ivoire et contribution à la mise au point de tests permettant son diagnostic*. Annal. Univer. Abid. – Série C – Tome XI, 103-122.
18. Liebig J., 1841, *Chimie appliquée à la physiologie végétale et à l'agriculture*. Traduit de l'Allemand par Gerhardt Ch., Edition Masson, Paris 544.
19. Loué A., 1967, *Fertilisation minérale du maïs*. 2. *Diagnostic foliaire du maïs* pp 560-567, in : *Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive (Madagascar)* du 19-25/11/1967, Edition IRAT, 1968. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:22129>. Consulté le 01/02/2015.
20. Loué A., 1984, *Maïs* pp 598-631, In: P. Martin-Prével, J. Gagnard & P. Gautier (Editors), *L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales*, Editions Lavoisier, Paris 810
21. Maltas A., Charles R., Bovet V. & Sokrat S., 2012, Effet à long terme des engrais organiques sur le rendement et la fertilisation azotée des cultures, *Rech. Agron. Suisse*, **3**, 156-163
22. Martin-Prével P., Gagnard J. & Gautier P., 1984, *L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales*, Editions Lavoisier. Paris, 810.
23. Morisseau L., 2005, *Etude du marché des fertilisants organiques*, Publication ITAVI, ITP, OFIVAL. <http://www.inra.fr>. Paris, 54 p. Consultation en avril 2014.
24. Moussa S., Mahamadou G., Amadou B. & Tabo R., 2012, *Phosphate : la recherche insiste depuis 40 ans sur ce facteur limitant des cultures pluviales, Investir dans la bonification des terres*, RECA, CORAF, Note d'information/Intrants n° 20, Niger, 5 .
25. Ndiaye M. & Sidibé M., 1992, *Recherche de formules d'engrais NPK économiquement rentables pour la culture de maïs pluvial*, Etudes et documents, ISRA Dakar, 29.
26. N'Zué B., Zohouri G.P., Yapi-Gnahoré V. & Djédji C., 2008, *Bien cultiver le manioc en Côte d'Ivoire, Fiche technique*, CNRA-CTA, Abidjan, 4.
27. Palm C.A., Myers R.J.K. & Nandwa S.M., 1997, *Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment*. Pp 123-217, In: R.J. Buresh, P.A. Sanchez & F. Calhoun (Editors), *Replenishment soil fertility in Africa*, Soil Society of America, Special publication n° **51**, Madison, 320.
28. Pamo E.T., Boukila B., Tonfack L.B., Momo M.C.S., Kana J.R. & Tendongeng F., 2005, Influence de la fumure organique, du NPK et du mélange des deux fertilisants sur la croissance de Moringa oleifera LAM. dans l'Ouest Cameroun, *LRRD News*, **17**, 53-62.
29. Payne R., 2007, *A guide to Anova and Design*. *GenStat Discovery Nairobi (Kenya)*, ICRAF. 113.
30. Perraud A., 1971, *Les sols* pp 269-390, In: *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire*, Mémoire ORSTOM n° **50**, Editions ORSTOM, Paris.
31. Rouanet G., 1997, *Le maïs, Le technicien d'agriculture tropicale*. CTA, Maisonneuve et Larose, Paris. 142.
32. Troupa S.G.F. & Koné M.H., 2003, *Recensement National de l'Agriculture 2001 et sécurité alimentaire*, Rapport de consultant FAO, EU, Minagra. Abidjan. 40.
33. Vidal P., 1963, *Croissance et nutrition minérale des mils (Pennisetum) cultivés au Sénégal*, Thèse de Docteur-Ingénieur de l'Université de Dakar, 150.
34. Vilain M., 1993, *La production végétale, La maîtrise technique de la production, Agriculture d'aujourd'hui. Sciences, Techniques, Applications*, Editions Lavoisier. Paris. 449.
35. Zro Bi G.F., Yao-Kouamé A. & Kouamé K.F., 2012, Evaluation statistique et spatiale de la fertilité des sols hydromorphes (gleysols) de la région du Bélier (Côte d'Ivoire), *Tropicultura*, **30**, 4, 236-2421.

K.P. Akanza, Ivoirien, PhD, Chercheur, Centre National de Recherche Agronomique, Abidjan, Côte d'Ivoire.

S. Sanogo, Ivoirien, PhD, Chercheur, Centre National de Recherche Agronomique, Abidjan, Côte d'Ivoire.

H.A. N'Da, Chercheur, Centre National de Recherche Agronomique, Abidjan, Côte d'Ivoire; Direction Régional de Korhogo, Station de Recherche de Ferkessedougou, Korhogo, Côte d'Ivoire.