

EFFETS DE LA FERTILISATION SUR LA FERTILITÉ DES SOLS ET LES RENDEMENTS: INCIDENCE SUR LE DIAGNOSTIC DES CARENCES DU SOL

**K. P. AKANZA^{1*}, S. SANOGO¹, C. K. KOUAKOU¹,
H. A. N'DA¹ et A. YAO-KOUAME²**

¹*Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) ;
01 BP 1740 Abidjan 01, Côte d'Ivoire*

²*Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY/UFR STRM ;
06 BP 688 Abidjan 06, Côte d'Ivoire*

* Correspondance, e-mail : pakanza@yahoo.com

RÉSUMÉ

Un essai a été conduit à la station CNRA de Man, à l'effet d'étudier les effets d'apports combinés d'engrais minéraux et de fumier sur la fertilité du sol et sur les rendements. Trois doses d'engrais minéraux et cinq niveaux de fumier ont été testés. La combinaison des niveaux des deux facteurs a permis d'obtenir quinze traitements. Les résultats montrent que le fumier est l'un des principaux moteurs de l'amélioration de la fertilité du sol et des rendements, en présence ou non d'engrais minéraux. Au niveau de la fertilité du sol, l'ensemble des caractéristiques chimiques a été amélioré, en particulier, les teneurs en phosphore, en calcium et la somme des cations. De nettes répercussions positives de l'amélioration de la fertilité du sol sur les productions ont été établies.

Un accroissement significatif des rendements, imputable au fumier, est observé. L'étude montre que le rendement est lié à la dose de chacun des éléments nutritifs indispensables du sol par une fonction de production. Pour trois facteurs du sol (phosphore, calcium, somme des cations), cette fonction de production est quadratique. L'ignorance des facteurs limitants de la production, l'utilisation de formules de fumure inadaptées au sol et à la culture entretiennent la persistance de faibles rendements des systèmes de culture. La correction des carences par une formule de fumure ajustée au sol et à la culture rétablit de hauts rendements. L'entretien organique du sol, aux multiples avantages agronomiques, constitue une solution appropriée aux problèmes du paysan.

Mots-clés : *Fumier, Engrais minéraux, Carences, Sol, Rendement, Zea mays, Oryza sativa.*

ABSTRACT

Effects of fertilization on soil fertility and yields: impact on the diagnosis of the deficiencies of the soil

A test, driven to the CNRA station of Man, had for aim to study the effects of combined contributions of fertilizers and manure on the fertility of soil and on the yields. Three fertilizers doses and five levels of manure have been tested. The combination of the levels of the two factors gives fifteen treatments. The results show that manure is one of the main motors of the improvement of the fertility of soil and yields in presence or no of fertilizers. To the level of the soil fertility, the set of the chemical features has been improved distinctly, in particular the phosphorus, the calcium and the total cations. Net positive impacts of improving the fertility of the soil on the productions have been established. A meaningful growth of the yields, attributable to chicken manure, has been observed.

The survey shows that the yield is bound to the dose of each of the decisive nourishing elements of soil by a function of production. For three factors of soil (phosphorus, calcium, total cations), this function of production is quadratic. The ignorance of the limiting factors of the production and the use of non appropriate formula of manure lead to low yields at system of culture. The correction of the deficiencies by a formula of manure adjusted to the soil type and to the corn or rice crop helps re-establishing high yields. The organic maintenance of soil, to the multiple agronomic advantages, constitutes a solution appropriated to the peasant's problems.

Keywords : *Manure, mineral fertilizers, Deficiencies, Soil, Yield, Zea mays, Oryza sativa.*

I - INTRODUCTION

La dégradation des sols est reconnue comme l'un des problèmes cruciaux auxquels l'Afrique est particulièrement confrontée [1]. Dans les systèmes de culture à base de céréales, prédominant en Afrique au Sud du Sahara, la fertilisation minérale seule ne permet pas de maintenir le niveau de fertilité des sols ([2;3]. 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 cultureux [4]. L'accroissement spectaculaire des productions vivrières en Côte d'Ivoire, s'accomplit, sans aucune mutation technologique, au détriment de la forêt [5].

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 [2,6]. 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 [7]. Or, la majorité des sols d'Afrique de l'Ouest sont pauvres en matière organique [2] ce qui limite leur aptitude à supporter, de façon durable, une production végétale élevée. Le recours systématique aux engrais chimiques semble une solution appropriée ; mais ceux-ci provoquent, après une phase favorable, une acidification du milieu [8], une perte d'éléments (secondaires et oligo-éléments) et une libération de métaux lourds [9]. De plus, le coût élevé des engrais chimiques constitue une contrainte majeure à la production céréalière faiblement monétarisée ; ce qui entretient les sous-dosages de la fertilisation. La présente étude vise à évaluer les effets directs et résiduels du fumier sur la fertilité du sol et les rendements, dans un système de rotation maïs-riz, afin d'en déduire des relations fondamentales par rapport aux facteurs déterminants du milieu.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Site d'étude

L'essai a été conduit à la station CNRA de Man ($7^{\circ} 33' W$, $7^{\circ} 24' N$, 350 m), où la saison pluvieuse dure huit mois (mars-octobre), et la saison sèche, quatre mois (novembre-février). La pluviosité annuelle est de 1600 mm, faisant apparaître un pic en août. Le sol du site, résultant de l'altération du granite, est peu profond, riche en éléments grossiers. De texture argilo-sableuse, il comporte un horizon humifère peu épais.

II-2. 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 [10]. Quant à la variété de riz (*Oryza sativa* L.) testée (IDSA 78), elle est du type pluvial à grains longs et fins, dont le cycle est de 110 jours [11].

II-3. Matériel fertilisant

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

II-4. 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 est riche en matière organique ($\text{N} = 3,42 \text{ g.kg}^{-1}$; $\text{C} = 30,00 \text{ g.kg}^{-1}$) bien décomposée ($\text{C/N} = 8,77$). Cette donnée indique que le fumier apporté est un engrais organique [12] dont le potentiel fertilisant s'apprécie à travers les valeurs de la somme des bases (3,18 p.c.), des oligo-éléments ($\text{Fe} = 1240 \text{ mg.kg}^{-1}$ et $\text{Zn} = 260 \text{ mg.kg}^{-1}$) et du potentiel hydrogène au-dessus de la neutralité ($\text{pH} = 7,9$). Ce potentiel fertilisant est aussi caractérisé par sa teneur élevée en phosphore (1645 mg.kg^{-1}).

Tableau 1 : *Composition chimique du fumier de volaille utilisé comme engrais organique*

pH	C (g.kg^{-1})	N (g.kg^{-1})	C/N	Pass. (mg.kg^{-1})	K	Ca	Mg	Na	S	Fe (mg.kg^{-1})	Zn (mg.kg^{-1})	Cu
7,9	30,00	3,42	8,77	1645	2,42	0,43	0,16	0,17	3,18	1240	260	8

Pass. = Phosphore assimilable ; S = Sommes des bases

II-5. 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 : (1) F0, le témoin; (2) F1, la demi-dose et (3) F2, la dose complète conseillée par la recherche [13]. Le fumier constitue le facteur secondaire. Cinq quantités, correspondant aux cinq parcelles élémentaires de chaque sous-bloc, ont été définies : (1) Q0 = 00 t.ha^{-1} témoin; (2) Q1 = 05 t.ha^{-1} ; (3) Q2 = 10 t.ha^{-1} ; (4) Q3 = 15 t.ha^{-1} et (5) Q4 = 20 t.ha^{-1} . Quinze traitements issus de la combinaison des niveaux des deux facteurs ont été expérimentés (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Doses d'engrais minéraux et de fumier de volaille expérimentées

Groupe objets	Traitements	Engrais minéraux			Fumure organique (t.ha ⁻¹)
		NPK	Dolomie	Urée	
		(kg.ha ⁻¹)			
1	T00	0	0	0	0
	T01	0	0	0	5
	T02	0	0	0	10
	T03	0	0	0	15
	T04	0	0	0	20
2	T05	100	150	50	0
	T06	100	150	50	5
	T07	100	150	50	10
	T08	100	150	50	15
	T09	100	150	50	20
3	T10	200	300	100	0
	T11	200	300	100	5
	T12	200	300	100	10
	T13	200	300	100	15
	T14	200	300	100	20

II-6. Collectes et analyses de données

Trois 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 et, le troisième, après la récolte du riz. Constitués chacun de 60 échantillons composites, ils ont été analysés au laboratoire de l'AfricaRice. Les rendements en grains, exprimés à 14 et à 15 p.c. d'humidité respectivement, pour le riz et le maïs, ont été obtenus à l'issue de la récolte de chacune des parcelles utiles et, la production, ramenée à l'hectare, après séchage. Les données collectées ont été soumises à l'analyse de variance selon le logiciel GenStat [14]. La comparaison multiple des moyennes est le résultat du test de Student-Newman-Keuls, appliqué, au seuil de 5 p. c.

II-7. 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 [15;16] du type :

$$R = R_0 + \alpha X - \beta X^2 + e. \quad (1)$$

Où R représente le rendement de la culture ; R_0 , le rendement du témoin T00 ; α , 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.

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

III-1. Caractéristiques chimiques du sol avant l'implantation de l'essai

Les propriétés du sol, avant la mise en place de l'essai, ont été définies (**Tableau 3**). C'est un sol assez pauvre en matière organique ($N = 1,08 \text{ g.kg}^{-1}$ et $C = 10,62 \text{ g.kg}^{-1}$), bien décomposée ($C/N = 9,83$). Ce sol appartient à la sous-classe des ferralsols [17;18]. Ses propriétés chimiques témoignent d'un faible potentiel de fixation et d'échange d'éléments, si l'on en juge de la somme des bases ($S = 2,14 \text{ cmol.kg}^{-1}$) et du taux de saturation ($V = 24,75 \text{ p.c.}$). Le phosphore assimilable, pour une valeur de $P = 16,50 \text{ mg.kg}^{-1}$, manifeste l'une des principales carences minérales de ce ferralsol [19].

Tableau 3 : *Caractéristiques chimiques du sol du site avant l'implantation de l'essai*

N	C	C/N	Pass.	Ca	Mg	K	Na	CEC	S	V.
(g.kg^{-1})			(mg.kg^{-1})							(p.c.)
1,08	10,62	9,83	16,50	1,46	0,84	0,21	0,09	8,30	2,14	24,75

Pass. = Phosphore assimilable ; S = Sommes des bases, V. = Taux de saturation en bases

III-2. Effets du fumier sur la fertilité du sol

Toutes les caractéristiques chimiques du sol se sont avérées significatives [20]. Cependant, dans le présent article, l'analyse de la fertilité du sol a été spécialement focalisée sur trois facteurs décisifs (le phosphore assimilable, le calcium échangeable et la somme des cations) qui expliquent, de façon très nette les rendements des cultures.

III-2-1. Calcium échangeable

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

Sans engrais minéraux, le fumier a accru ces teneurs de 1,89 à 2,92 cmol.kg^{-1} (**Tableau 4**). Les taux d'accroissement, en comparaison avec le témoin T00, vont de 29,45 à 100 p.c., respectivement, pour des quantités de 5 et 20 t.ha^{-1} de fumier. L'apport de 20 t.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 cmol.kg^{-1} (**Tableau 4**). Les taux de bonification, par rapport à T00, sont compris entre 26,71 et 180 p.c., respectivement, pour des quantités de 5 et 20 t.ha^{-1} de fumier. L'apport de 20 t.ha^{-1} de fumier a quasiment triplé la richesse en calcium du sol. Combiné à la dose complète d'engrais chimique, le fumier a fait osciller les teneurs en cet élément entre 2 et 2,86 cmol.kg^{-1} (**Tableau 4**), soit des taux d'accroissement de 37 p.c. à 96 p.c., respectivement, pour 5 et 15 t.ha^{-1} de fumier. L'apport de 20 t.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 fixation du calcium par le sol. 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.

III-2-2. Somme des cations

Les valeurs de la somme des cations ont oscillé entre 2,14 et 5,04 cmol.kg^{-1} selon les traitements (**Tableau 4**). Sans engrais minéraux, le fumier a fait varier la somme des cations de 2,51 à 3,73 cmol.kg^{-1} (**Tableau 4**). Les taux d'augmentation ont été compris entre 17,29 et 74,30 p.c., respectivement, pour 5 et 20 t.ha^{-1} de cette matière organique. L'application de 20 t.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 chimique et le fumier, la somme des cations a fluctué entre 2,41 et 5,04 cmol.kg^{-1} (**Tableau 4**) avec des taux d'accroissement allant de 12,62 à 135,51 p.c., respectivement, pour 5 et 20 t.ha^{-1} de fumier.

Les traitements T08 et T09, ont, respectivement, doublé et triplé la valeur de la somme des cations par rapport à T00. En présence de la dose complète d'engrais chimique, le fumier a consigné des valeurs variant de 2,67 à 4,08 cmol.kg^{-1} (**Tableau 4**) soit des taux d'accroissement de 24,77 à 90,65 p.c. par rapport au témoin T00, respectivement, pour 5 et 15 t.ha^{-1} de matière organique. Le traitement T13 a doublé la valeur de la somme des cations. Mais, le plus fort taux de majoration de la somme des cations (135,51 p.c.), 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 des horizons supérieurs du sol, conformément aux résultats de [21].

Tableau 4 : 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. (p.c.)	Calcium échangeable. (cmol.kg ⁻¹)	Taux Ca (p.c.)	Somme cations (cmol.kg ⁻¹)	Taux S. (p.c.)
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	69,70	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	74,30
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	86,30	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		51,50		2,37		3,12	
PPDS 5 p.c.		24,80		1,00		1,18	
CV p.c.		33,40		29,35		26,25	

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

III-2-3. Phosphore assimilable

Les effets des traitements sur le phosphore se sont traduits par des valeurs comprises entre 16,50 et 100,75 mg.kg⁻¹ (**Tableau 4**). Sans engrais minéraux, les teneurs en phosphore ont été accrues par le fumier. Mais, pour 5 t.ha⁻¹, une teneur de 30,75 mg.kg⁻¹ a été acquise, contre 28 mg.kg⁻¹ avec 10 t.ha⁻¹.

Ce résultat discordant, n'ayant aucun fondement scientifique, pourrait être inscrit au compte d'une erreur d'échantillonnage. Les apports de 15 et 20 t.ha⁻¹ de fumier accèdent à un niveau de teneur identique de 75 mg.kg⁻¹ (**Tableau 4**). Les taux de majoration, par rapport au témoin T00, ont varié de 69,7 à 357,58 p.c., pour des quantités de 5 à 20 t.ha⁻¹ de fumier. Les traitements combinant la demi-dose d'engrais chimique avec du fumier ont été les plus performants vis-à-vis de la fixation du phosphore par le sol. Ainsi, les valeurs ont évolué de 33,5 à 100,75 mg.kg⁻¹ (**Tableau 4**). Les taux de majoration ont été compris entre 103 et 510,61 p.c., 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 4**) pour des taux d'augmentation, par rapport au témoin T00, variant de 154,55 à 412,12 p.c., respectivement, selon 5 et 15 t.ha⁻¹ de fumier.

Le plus fort taux d'accroissement (510,61 p.c.) 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 [22] et [19], 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 fixateur vis-à-vis du phosphore [23]. Environ 80 p.c. 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 [24;25]. Les techniques de gestion de la fertilité, fréquemment adoptées par les agriculteurs en Afrique, conduisent inéluctablement à un épuisement rapide des sols [26]. 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 [27].

III-3. Effets du fumier sur le rendement des cultures

III-3-1. Rendement du maïs

Le rendement en grains a oscillé entre 2,08 et 6,08 t.ha⁻¹ selon les traitements (**Tableau 5**). 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 5**). Les taux d'amélioration respectifs sont estimés à 62 et 180 p.c., 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 chimique et du fumier, le rendement a progressé de 3,65 à 5,75 t.ha⁻¹ (**Tableau 5**).

La comparaison avec T00 permet de déceler des taux d'accroissement passant de 75,45 à 176,53 p.c., respectivement, pour 5 et 20 t.ha⁻¹ de fumier (**Tableau 5**). 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 5**). Les taux d'accroissement ont été compris entre 107,94 et 192,78 p.c., respectivement, pour 5 et 20 t.ha⁻¹ de fumier. Il n'y a 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 p.c. par rapport au témoin T00. Mais cette performance s'est renforcée avec l'application conjointe des deux types de fumure. Un appoint minéral est essentiel pour rehausser les taux d'augmentation de 190 à 192 p.c. en présence de la dose complète d'engrais chimique. Ce résultat indique que le maïs est sensible aux carences minérales du sol. A cet effet, il est reconnu comme un indicateur fiable d'un manque de minéraux dans le sol [27].

III-3-2. Rendement du riz

Le rendement paddy a varié de 2,89 à 5,00 t.ha⁻¹ selon les traitements (**Tableau 5**). Sans engrais minéraux, l'arrière-effet du fumier a amélioré le rendement qui est passé de 3,84 à 4,66 t.ha⁻¹. Les taux d'accroissement correspondants sont de 32,87 et 61,25 p.c., pour des quantités de 5 et 20 t.ha⁻¹ de fumier. En présence de la demi-dose d'engrais chimiques, le rendement imputable à l'arrière-effet du fumier a évolué de 3,79 à 4,36 t.ha⁻¹. Aussi, les taux d'augmentation, assignables à ce facteur, par rapport à T00, ont-ils été estimés à 44,29 et 50,87 p.c., respectivement, pour 5 et 10 t.ha⁻¹ de fumier (**Tableau 5**). Avec l'arrière-effet des apports de 15 et 20 t.ha⁻¹ de fumier, des taux d'accroissement plus discrets de 31,14 et 41,18 ont été observés. Pour ce qui concerne les traitements combinant la dose complète d'engrais minéraux avec du fumier, l'évolution du rendement attribuable à l'arrière-effet de cette matière organique est passée de 3,98 à 5,00 t.ha⁻¹. Les taux d'accroissement ont été compris entre 37,72 et 73 p.c., pour l'arrière-effet des apports de 5 à 15 t.ha⁻¹ de fumier (**Tableau 5**). Le fumier et son association avec la demi-dose d'engrais minéraux ont maintenu la productivité du sol. Le riz n'a bénéficié d'aucun apport organique ce qui a permis d'évaluer les arrière-effets du fumier [28]. Cet engrais organique, dont la valeur C/N équivaut à 8,77, est une substance bien décomposée, vite minéralisée en fournissant suffisamment d'azote au sol [29;30].

En dépit de leur faible et variable teneur en éléments nutritifs, les matières organiques sont bénéfiques, car elles ont un effet favorable sur les caractéristiques du sol. Elles lui permettent de stocker davantage d'eau, contribuant ainsi à accroître, de façon efficiente, sa fertilité. De plus, la matière organique constitue un milieu de culture pour les organismes vivants dans le sol. Grâce à ces propriétés, les engrais organiques garantissent l'obtention de meilleurs effets résultant de l'utilisation simultanée de compléments minéraux. L'incorporation d'un tel engrais organique au sol a modifié sa fertilité et accru sa disponibilité en éléments nutritifs pour les plantes [6]. Ainsi, les cultures, installées dans des conditions de nutrition favorable, ont pu assurer leur plein potentiel de production. À forte dose, cet engrais organique a coopéré à la correction des carences minérales du ferralsol.

Tableau 5 : Effets conjugués des deux types d'engrais sur les rendements du maïs et du riz et taux d'accroissement.

Groupe d'objets	Traitements expérimentaux	Rendement du maïs (t.ha ⁻¹)	Taux accrois. (p.c.)	Rendement du riz (t.ha ⁻¹)	Taux accrois. (p.c.)
1	T00	2,08 f	0,0	2,89 bc	0,0
	T01	3,37 def	62,09	3,84 ab	32,87
	T02	3,94 cd	89,53	3,77 ab	30,47
	T03	5,54 ab	116,43	3,86 ab	33,56
	T04	5,82 a	180,18	4,66 a	61,25
2	T05	2,39 ef	14,80	2,60 c	-10,03
	T06	3,65 de	75,45	4,17 a	44,29
	T07	4,31 bcd	107,22	4,36 a	50,87
	T08	5,69 ab	174,53	3,79 ab	31,14
	T09	5,75 ab	176,53	4,08 a	41,18
3	T10	3,00 def	44,40	4,26 a	47,40
	T11	4,32 bcd	107,94	3,98 ab	37,72
	T12	5,09 abc	145,13	4,36 a	50,87
	T13	6,04 a	190,61	5,00 a	73,01
	T14	6,08 a	192,78	4,73 a	63,67
Moyenne générale		4,47		4,03	
PPDS 5p.c.		1,29		0,76	
CV p.c.		14,85		13,17	

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

III-4. Diagnostic des carences du sol

La mise en application du principe de diagnostic des déficiences minérales naturelles du sol et de l'étude des fonctions de production des cultures du système a permis d'établir des ajustements linéaires et quadratiques significatifs [31;16]. Les coefficients de détermination (R^2) affichés (**Figures 1, 2 et 3**) sont élevés et compris entre 0,85 et 0,97. Ils indiquent que dans 85, 86 et 97 p.c. des cas, le rendement du maïs est déterminé, respectivement, par la somme des cations, le calcium échangeable et le phosphore assimilable. Ces valeurs de R^2 , bases de la hiérarchisation des carences du sol, placent le phosphore au premier rang des facteurs limitant les rendements (**Figure 1**). Il est suivi par le calcium (**Figure 2**). La somme des cations se classe en troisième et dernière position (**Figure 3**). A l'étape de l'analyse finale, il apparaît que les résultats obtenus sont plausibles. En effet, l'utilisation croisée des données de rendements à celles des analyses de sol 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, le calcium et la somme des cations optimisant ainsi la réponse attendue [32]. D'autres facteurs de l'environnement (climat et fertilité intrinsèque du sol) sont crédités de 3 à 15 p.c. des variations du rendement du maïs [33]. Ce résultat corrobore celui de [25] qui affirme que le phosphore est le nutriment le plus limitant, à l'échelle humaine, comparé à l'azote et au carbone.

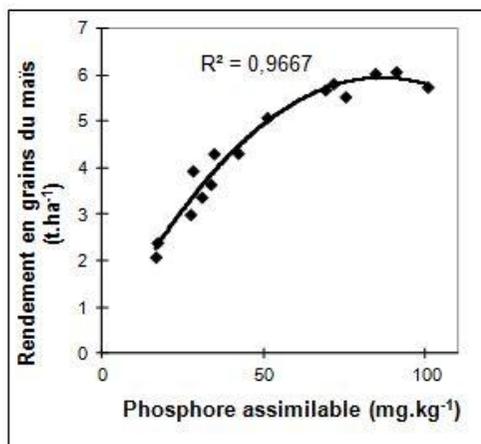


Figure 1 : *Modèle d'évolution du rendement du maïs en fonction du phosphore assimilable*

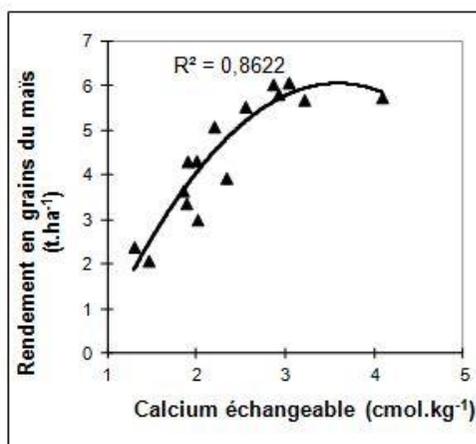


Figure 2 : *Modèle d'évolution du rendement du maïs en fonction du calcium échangeable*

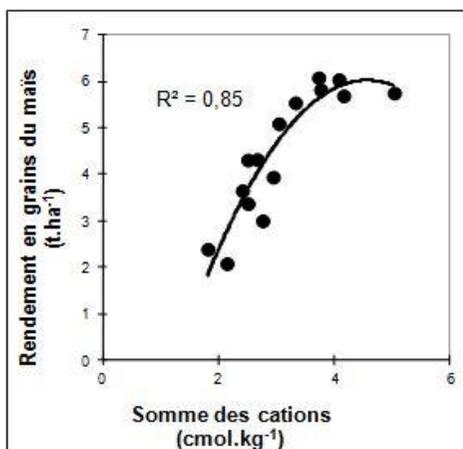


Figure 3 : Modèle d'évolution du rendement en grains du maïs en fonction de la somme des cations

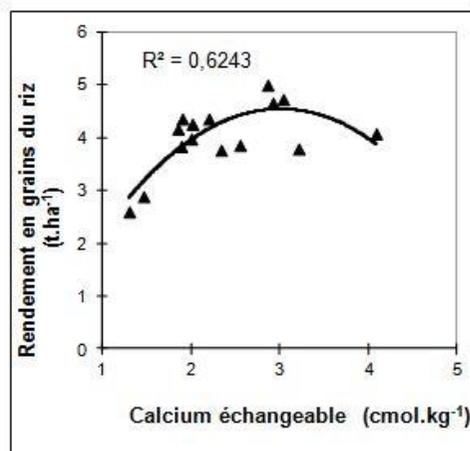


Figure 4 : Modèle d'évolution du rendement en grains du riz en fonction du calcium échangeable

Cependant, le phosphore et le calcium sont déjà connus, en zone forestière de Côte d'Ivoire, comme des facteurs limitants de la production [19] contrairement à la somme des cations dont la découverte contribue à la réactualisation de la liste des facteurs limitants en zone forestière de notre pays. Dans le sol d'une zone agro pédoclimatique donnée, plusieurs déficiences sont toujours bien établies. La production est limitée par le facteur le plus éloigné de son optimum. Et, tant que la correction du facteur le plus limitant n'est pas réalisée, les actions sur les autres sont peu efficaces. Le fumier, riche en phosphore (1645 mg.kg⁻¹), a corrigé la carence du sol (16,5 mg.kg⁻¹) en cet élément (*Tableau 1 et 3*). Suite à la correction du premier facteur déficient, c'est un autre qui a pris sa place [34]. Cette hypothèse a été confirmée par le riz qui a succédé au maïs (*Figure 4*).

Les fonctions de production de cette culture certifient que les déficiences persistent et restent très actives. En effet, après la correction de la carence en phosphore par le fumier, un nouvel ordre des déficiences, avec des intensités amoindries, s'est établi, conformément aux valeurs affichées des coefficients de détermination : le calcium échangeable, avec $R^2 = 0,62$, est devenu le premier facteur limitant (*Figure 4*), suivi de la somme des cations (*Figure 5*) pour $R^2 = 0,61$. Le phosphore, avec $R^2 = 0,54$, est relégué en troisième position (*Figure 6*). Le taux de réduction de l'intensité des carences, dû aux deux types d'engrais, identique pour le calcium et la somme des cations, est estimé à 27,6 p.c. par rapport aux valeurs initiales de R^2 affichées chez le maïs. Par contre, pour le phosphore dont la correction est jugée effective, une importante réduction de 43,4 p.c. de l'intensité de la déficience est acquise.

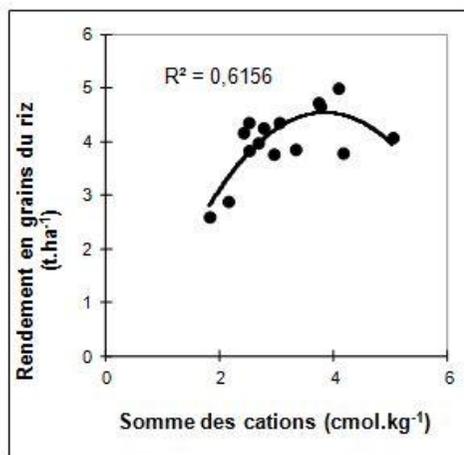


Figure 5 : *Modèle d'évolution du rendement du riz en fonction de la somme des cations*

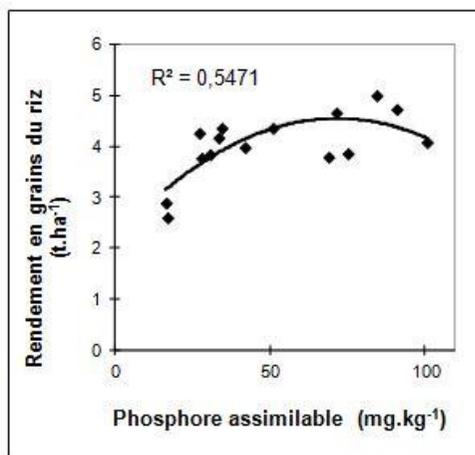


Figure 6 : *Modèle d'évolution du rendement du riz en fonction du phosphore assimilable*

Ces résultats traduisent le jeu capricieux et versatile des carences minérales du sol, tendant à pérenniser de faibles rendements dans chacune des zones agro climatiques du pays. L'importance des carences minérales a été prouvée en Côte d'Ivoire, grâce à la méthode des essais soustractifs [19]. La méthode des essais factoriels, suivie de l'étude de fonctions de production des cultures, semble plus appropriée que la précédente. En effet, elle ne se limite pas aux simples éléments majeurs (NPK) et secondaires (CaMgS). Mais le diagnostic du facteur limitant prend en compte l'ensemble des caractéristiques chimiques du sol. Les moyens pour diagnostiquer le facteur limitant sont nombreux. Parmi eux, citons les tests biologiques de croissance et les indicateurs d'état physiologique.

Ils sont les seuls à pouvoir identifier le facteur limitant de façon instantanée [25]. Le concept de facteur limitant fut élaboré dans le cadre de la recherche agronomique. L'extrême clarté de sa signification et la remarquable efficacité de sa mise en œuvre permirent d'éviter la famine à l'Europe occidentale. Dans cette même optique, l'exploitation assidue et harmonieuse de ce concept pourrait éviter la faim à l'Afrique, seul continent dans lequel de perpétuels problèmes de sécheresse et de famine sont les plus récurrents [33]. Repris par divers scientifiques (écologistes, limnologues, océanographes...), le concept vit sa signification et sa clarté originelle s'altérer [25].

IV - CONCLUSION

Les résultats de cette étude montrent l'intérêt indéniable de combiner des engrais minéraux aux fumures organiques pour améliorer la fertilité des sols et les rendements des cultures vivrières. L'utilisation croisée des données de rendements à celles du sol 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 production des cultures du système démontre que le phosphore, le calcium et la somme des cations expliquent nettement les rendements. Ce sont des facteurs limitants de la productivité des ferralsols de Man. La persistance de faibles rendements des cultures dans les différentes zones agro écologiques du pays, trouve en ce concept une explication cohérente du jeu de substitution permanente des facteurs déficients, mis en évidence par les fonctions de production du maïs et du riz.

Elles certifient qu'après des apports de fertilisants, les carences persistent et demeurent très actives : la fertilisation ne les neutralise pas, mais accroît le stock d'éléments nutritifs du sol, atténuant ainsi leurs effets dépressifs sur les rendements. 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 d'acidification tout en maintenant des rendements élevés et stables. Son application aux ferralsols s'est avérée être le gage d'une efficacité des engrais minéraux. L'amélioration de la fertilité des sols et la correction des carences, imputables aux apports combinés des deux types d'engrais, pourraient maintenir, dans le cadre d'une gestion durable des sols, l'accroissement des rendements et la sédentarisation des systèmes de cultures. En conséquence, cette expérience mériterait d'être menée dans d'autres zones agricoles du pays.

RÉFÉRENCES

- [1] - K. H. ASSIE, ANGUI et A. J. TAMIA, *Europ. Journ. Scient. Resear.*, 23 (1) (2008) 149-166
- [2] - ANONYME, Ed. FAO, Rome, (2003) 63 p
- [3] - B.V. BADO, P.M. SEDOGO, M.P. CESCAS, F. LOMPO et A. BATIONO, *Cah. Agric.* (6) (1997): 571-575
- [4] - ANONYME, AFD – CIRAD – FIDA, Ed. La Fertoise, (2011) 195 pp.
- [5] - S. G. F. TROUPA et M. H. KONE, Abidjan, (2003) 40.

- [6] - C. A. PALM, R. J. K. MYERS and S. M. NANDWA, in "Replenishment soil fertility in Africa", Ed. Soil Society of America, Special publication n° 51, Madison, (1997) 123-217
- [7] - G. ROUANET, Ed. CTA, Maisonneuve et Larose, Paris, (1997) 142 p.
- [8] - M. SANGARE, S. FERNANDEZ-RIVERA, A. BATIONO, P. HIERNAUX et V. S. PANDEY, Cah. Agric., 10 (2001) 319-325.
- [9] - G. LEMIEUX et D. GERMAIN, Ed. Université Laval, Québec, (2001) 26.
- [10] - E. HAINZELIN, Abidjan, (1984). 20 pp.
- [11] - ANONYME, "Catalogue officiel des variétés de riz", Abidjan. (2002) 39 pp
- [12] - L. MORISSEAU, Ed. ITAVI, ITP, OFIVAL, Paris, (2005) 54, www.inra.fr. Consultation du 24/02/2014.
- [13] - B. N'ZUE, G.P. ZOHOURI, V. YAPI-GNAHORE, C. DJEDJI, Ed. CNRA-CTA, Abidjan, (2008) 4.
- [14] - R. PAYNE, "A guide to Anova and Design in GenStat", Ed. GenStat Discovery, Nairobi, (2007) 113 pp.
- [15] - M. VILAIN, "La production végétale. La maîtrise technique de la production". Ed. Lavoisier, Paris (1993) 449 pp.
- [16] - M. GIROUX et M. LEMIEUX, Agrosolutions 17 (1) (2006) 39-50
- [17] - ANONYME, "Classification des sols", Abidjan, (1967) 63 p
- [18] - A. PERRAUD, in Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire, Ed. ORSTOM, Paris, (1971) 269-390
- [19] - J. GIGOU, Agron. Tropi., 42 (1) (1987) 20-28
- [20] - K. P. AKANZA et G. YORO, Agron. Afric. 15 (3) (2003) 135-144.
- [21] - P. BOISSEZON, Cah. ORSTOM, série Pédologie. 3 (4) (1970). 391-418.
- [22] - J. PICHOT, F. AL ZAHAWE et P. F. CHABALIER, in AIEA. Ed. Colloque Soil organic matter studies. Brunswick. (1977) 83-96.
- [23] - B. LE BUANEC et R. D. SAINT-AMAND, Annal Univer. Abid, Série C, XI (1975) 103-122.
- [24] - S. MOUSSA, G. MAHAMADOU, B. AMADOU et R. TABO, Ed. RECA, CORAF, Note d'information/Intrants n° 20, Niger, (2012) 5 p.
- [25] - J. BARROIN, "Phosphore, azote, carbone...du facteur limitant au facteur de maîtrise". Le courrier de l'environnement de l'INRA n° 52. (2004) 1-52.
- [26] - M. YEMEFACK, L. NOUNAMO, R. NJOMGANG et P. BILONG, Tropicultura, 22 (1) (2004) 3-10.
- [27] - A. DIOUF, A. DIOP T. A., A. F. NDIAYE M., NDIAYE A. S. et GUEYE M., Jour. Sci., 8 (3) (2008) 10-17
- [28] - A. MALTAS, R. CHARLES, V. BOVET et S. SOKRAT, Rech. Agron. Suisse, Vol III (2012) 156-163

- [29] - E. T. PAMO, B. BOUKILA, L. B. TONFACK, M. C. S. MOMO, J.R. KANA et F. TENDONKENG, *LRRD News*, 17 (3) (2005) 53-62
- [30] - P. LEVASSEUR et C. AUBERT, *Techniporc*, Vol XXIX (2) (2006.) 3-11
- [31] - M. NDIAYE et M. SIDIBE, Ed. *Etudes et documents ISRA Dakar*, (1992) 29 p.
- [32] - S. KARAM. *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, (2004) 234 p.
- [33] - P. DUGUE et J. GIGOU, in *Mémento de l'agronome*. Ed. Jouve. Paris (2002) 601-641.
- [34] - B. KONE, J. B. ETTIEN, G. AMADJI et S. DIATTA, *Afric. Crop Scien. Jour*, 8 (2), (2008) 133-145.