

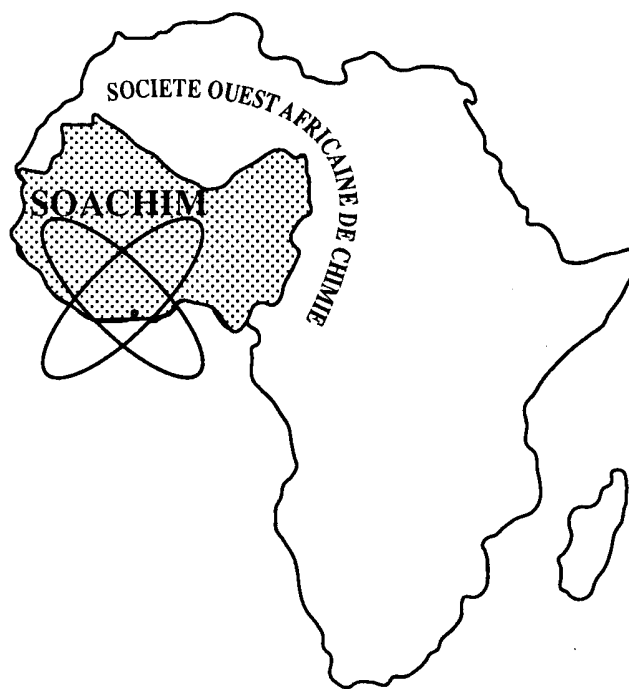
Effets des fumures sur la fertilité, les composantes de rendement et diagnostic des carences du sol sous culture de riz sur les ferralsols en Côte d'Ivoire

Paul Akanza et Souleymane Sanogo

Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie

J. Soc. Ouest-Afr. Chim.(2017), 043 : 1 - 10

22^{ème} Année, Juin 2017



ISSN 0796-6687

Code Chemical Abstracts : JSOCF2

Cote INIST (CNRS France) : <27680>

Site Web: <http://www.soachim.org>

Effets des fumures sur la fertilité, les composantes de rendement et diagnostic des carences du sol sous culture de riz sur les ferralsols en Côte d'Ivoire

Paul Akanza ^{1*} et Souleymane Sanogo ¹

¹Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), 01 BP 1 740 Abidjan 01 (Côte d'Ivoire).

(Reçu le 24/05/2016 – Accepté après corrections le 26/07/ 2017)

Résumé : Un essai a été conduit à la station CNRA de Man pour étudier les effets d'apports combinés d'engrais et de fumier sur la fertilité du sol et les rendements du maïs (*Oryza sativa* L.). 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 et des rendements. L'ensemble des caractéristiques chimiques du sol a été amélioré, notamment, le phosphore et le calcium. Des répercussions de cette amélioration de la fertilité du sol sur les rendements du riz ont été établies. Un accroissement significatif de la fertilité et des rendements, imputable au fumier, est observé. Les plus importantes productions de paddy, comprises entre 4,66 et 5,00 t.ha⁻¹, procèdent des traitements caractérisés par un apport d'au moins 15 t.ha⁻¹ de fumier. Les rendements en grains et en matière sèche du riz 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 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.

Mots clés: Engrais minéraux, fumier de volaille, nutrition, rendement, Riz, *Oryza sativa*

Effects of manure on fertility, the yield components and diagnosis of the soil deficiencies under rice cultivation on ferralsols in Côte d'Ivoire

Abstract: a trial was carried out at CNRA station in Man, in order to study the effects of combined application of fertilizers and manure on the soil fertility and yields of corn (*Oryza sativa* L.). 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 and yields. All chemical characteristics of the soil have been improved, notably phosphorus and calcium. Impacts of these changes on soil' fertility and plant performance have been established. A significant increase in the fertility and yields, due to manure, is observed. The most important productions of paddy, understood between 4.66 and 5.00 t.ha⁻¹, proceed from the treatments characterized by one at least provision 15 t.ha⁻¹ of manure. Yields of rice 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 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.

Key words: Fertilizers, manure of poultry, nutrition, yield, Rice, *Oryza sativa*

* Auteur de correspondance : paul.akanza@yahoo.com

1. Introduction

Le riz occupe le troisième rang des productions alimentaires et représente 6 à 8 % des productions vivrières en Côte d'Ivoire. Cette céréale est la plus consommée (environ 70 kg.an⁻¹ par personne). La consommation totale nationale est estimée à 1,4 million de tonnes ^[1] et la production nationale, évaluée à 700 000 tonnes en 2007, ne couvre que 50 % des besoins ^[2]. Ces chiffres révèlent un déficit de 700 000 tonnes et obligent l'Etat ivoirien à recourir à de grosses importations qui constituent une hémorragie financière de plus de 150 milliards de devises par an ^[1]. Deux systèmes de production rizicole sont rencontrés dans le pays, à savoir les rizicultures pluviale et irriguée. Ils sont pratiqués à la fois en zones forestière et savanicole. Les deux tiers de la superficie totale de production de riz sont consacrés à la riziculture pluviale, caractérisée par une culture manuelle peu intensive aux très faibles rendements (1,2 t.ha⁻¹ de paddy) et une production destinée pour l'essentiel à l'autoconsommation. Le déficit perdure pour diverses raisons : (i) la non maîtrise des itinéraires techniques par les producteurs, (ii) la chute des rendements consécutifs à une baisse de fertilité des sols et aux contraintes biotiques. La variation des rendements en grains entre la station de recherche (3 à 4 t.ha⁻¹) et le milieu rural (1 t.ha⁻¹) est une indication des différences dans les niveaux de fertilité des sols, d'intensification de la culture ^[3] et la mise en application des itinéraires techniques recommandés. En effet, les sols acides des zones tropicales humides sont caractérisés par une faible capacité d'échange cationique, de faibles teneurs en éléments minéraux (P, K, Ca, Mg) et par une acidité marquée ^[4]. Or, des possibilités de maintien et d'amélioration de la fertilité des sols en vue d'accroître leur productivité sont connues. Des apports combinés de différents types de matière organique avec des engrais chimiques augmentent les éléments minéraux disponibles pour les besoins des plantes ^[5]. En effet, la fertilisation minérale n'est efficace que s'il existe dans le sol un taux minimum de matière organique formant, avec l'argile, le complexe argilo humique ^[6]. Les applications conjointes des deux types de fumures participent au renforcement de l'efficacité des engrais chimiques. Il en résulte une nette amélioration du capital de fertilité du sol ^[7; 8] et par conséquent une bonne aptitude à la production. Cette expérience s'inscrit dans le cadre de

l'intensification durable des systèmes de culture à base de céréales. Elle vise aussi à identifier les avantages agronomiques liés à l'application conjointe des deux types de fumure sur la fertilité des sols rizicoles et les rendements du riz en vue d'y repérer un argument complémentaire pour établir des relations fondamentales sol-plante, bases d'une formulation efficace d'engrais adaptée au sol et à la culture.

2. Matériel et méthodes

2.1. Site

L'essai a été conduit à la station CNRA de Man (70 33' W, 70 24' N, 350 m). La région de Man est soumise à un climat de montagne avec une longue saison des pluies de mars à octobre et une petite saison sèche de novembre à février ^[9]. La pluviométrie moyenne annuelle oscille entre 1600 et 2100 mm. Elle fait apparaître un pic en août. L'hygrométrie y est très élevée et tourne autour de 80 %. Le sol du site est issu de l'altération de matériau granitique. Il est peu profond et riche en éléments grossiers. De texture argilo-sableuse, il comporte un horizon humifère peu épais, occupe un versant dont la pente est estimée de 2 à 5 % et est donc soumis à l'érosion ^[9]. L'indice d'érosivité des pluies de cette région de Man varie de 242 à 415. Cet indice dépend de l'intensité et du caractère torrentiel de la pluie. Il varie très peu sur l'ensemble de la zone et reste faible ^[10].

2.2. Matériel végétal

La variété de riz (*Oryza sativa* L.) utilisée est IDSA 77 ^[11]. C'est une variété pluviale améliorée à longs grains. Ses caractéristiques principales sont : un taux de tallage moyen, un port de feuille érigée, une hauteur d'un mètre à maturité, un cycle semis-maturité de 130 jours. Elle a été choisie pour ses qualités qui sont: (i) un bon potentiel de production; (ii) une résistance à la verse, à la panachure jaune et à la pyriculariose; (iii) une tolérance à la sécheresse et à la toxicité due au fer.

2.3. Matériel organique fertilisant

La fumure organique utilisée est un mélange sec de déjections de volaille, de litière de balle et de son de riz. La composition chimique de ce fumier a été déterminée (**tableau I**).

2.4. Dispositif expérimental et traitements

L'essai a été mené selon un dispositif en "split-plot" à quatre répétitions avec deux facteurs étudiés. Les engrais minéraux ont constitué le facteur principal à trois niveaux: (a) F0 = le témoin sans engrais ; (b) F1 = la demi-dose et (c) F2 = la dose complète recommandée. Le fumier a représenté le facteur secondaire. Cinq quantités de fumier, correspondant aux cinq parcelles élémentaires de chaque sous bloc, ont été définies comme suit: (a) Q0 = 0,0 t.ha⁻¹ ou le témoin sans fumier ; (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, résultant de la combinaison des niveaux des deux facteurs, ont été expérimentés (**tableau II**).

2.5. Collecte des échantillons de sol, méthodes d'analyses chimiques et objectifs visés

Trois prélèvements de terre, de l'horizon superficiel (0-30 cm), ont été effectués à la tarière: le

premier, avant les apports des engrais, le deuxième huit mois après l'application du fumier et le dernier, après la récolte du riz. Les deux derniers prélèvements étaient constitués chacun de 60 échantillons composites, analysés au laboratoire de l'AfricaRice. La méthode à l'acétate d'ammonium 1 M à pH 7 ^[12] a été utilisée pour déterminer les teneurs en bases échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺). Le carbone organique total a été déterminé selon la méthode de ^[13]. Le phosphore assimilable a été déterminé à l'aide du bicarbonate de sodium (NaHCO₃) 0,5M à pH = 8,5. Le dosage de l'azote est effectué par la méthode Kjeldahl. Les objectifs visés par les analyses de sol étaient : (i) évaluer le niveau de fertilité du sol au départ de l'expérience ; (ii) tester l'influence des micro-organismes du sol vis-à-vis de la décomposition de la matière organique apportée et la libération des éléments nutritifs et (iii) juger des améliorations concrètes apportées par le fumier au sol et aux composantes de rendement du riz souscrivant à l'établissement de relations fondamentales sol-plante.

Tableau I: Composition chimique du fumier de volaille utilisé comme engrais
Chemical composition of the chicken manure used

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	30,00	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

Tableau II: Doses d'engrais minéral et de fumure de volailles expérimentées
Rates of mineral fertilizers and chicken manure used in the experiment

Série d'objets	Traitements	Engrais minéral			Fumure organique
		NPK	Dolomie	Urée	
		(kg.ha ⁻¹)			(t.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

2.6. Conditions de réalisation de l'essai, mesures et analyses de données

L'expérience a été menée durant deux campagnes consécutives selon une succession culturale biennale maïs-riz. Le fumier a été appliqué en première année. Il a été épandu de façon homogène à la surface de la parcelle concernée et enfouie à la daba. Ainsi, le riz a bénéficié aussi bien des effets directs des engrais chimiques que des effets résiduels du fumier. Le semis du riz a été effectué selon des écartements de 0,20 m x 0,20 m soit une densité de 250 000 poquets. ha⁻¹. Un traitement herbicide au Ronstar, à la dose de 4 l.ha⁻¹, a été appliqué en prélevée. Le rendement paddy est le résultat de la récolte des panicules de chaque parcelle utile. Après séchage et battage de celles-ci, suivis de mesures d'humidité, les grains ont été pesés par parcelle utile et les rendements, exprimés à 14 % d'humidité, ramenés à l'hectare. La paille de riz a été fauchée à ras de sol et pesée. Les poids frais, par parcelle utile, ont été notés. Un échantillon d'environ 1 kg a été prélevé par parcelle utile. Ces 60 échantillons, placés à l'étuve à 75° C pendant 72 heures, ont été à nouveau pesés. La matière sèche totale aérienne, celle du système racinaire étant jugée négligeable, produite par parcelle utile a été calculée à partir des données issues aussi bien des échantillons que des poids frais des pailles et des panicules. Toutes les données collectées ont été soumises à l'analyse de variance selon le logiciel GenStat^[14]. La comparaison multiple des moyennes, en cas de différences significatives, est le résultat du test de Scheffe, appliqué au seuil de 5 %

2.7. Diagnostic des déficiences primaires 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, 17, 18] du type :

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

où R représente le rendement de la culture ; R₀, 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 par rapport au modèle quadratique ajusté. Quand la dérivée première R' de la fonction de production, par rapport à l'élément nutritif décisif du sol X, est annulée alors le facteur X atteint son niveau optimum^[17]. On obtient alors :

$$\delta R / \delta X = R' = - 2\beta X + \alpha \quad (2)$$

$$d'où : X = \alpha / 2\beta \quad (3)$$

La valeur α/2β est la dose optimale de l'élément nutritif décisif du sol garantissant un rendement maximum.

3. Résultats et discussion

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

Les propriétés chimiques du sol, avant l'application des traitements, ont été définies (**Tableau III**). 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). Les matières organiques jouent un rôle important dans le fonctionnement global du sol, au travers de ses composantes qui définissent la notion de fertilité. Elles sont essentiellement décrites par les teneurs en carbone et en azote dont le rôle au niveau des sols est triple (physique, chimique et biologique). L'évolution de la matière organique incorporée au sol s'accompagne d'une diminution progressive du rapport C/N jusqu'à des valeurs d'environ 10. Le rapport carbone/azote est donc un indicateur du bon fonctionnement du sol. La classification du rapport C/N de notre sol est jugée satisfaisante car sa valeur 9,83 est inférieure ou pratiquement égale à 10^[19, 20]. Ce sol appartient à la classe des ferralsols^[21, 22]. Ses propriétés chimiques témoignent d'un faible potentiel de fixation et d'échange d'éléments nutritifs, si l'on en juge de la somme des bases (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 traduisant un sol très pauvre^[23], manifeste l'une des principales carences minérales de ce ferralsole^[24].

Tableau III. Caractéristiques chimiques du sol du site avant l'application des traitements

N	C	C/N	Pass.	Ca	Mg	K	Na	CEC	S	V.
(g.kg ⁻¹)	(g.kg ⁻¹)		(mg.kg ⁻¹)			(cmol.kg ⁻¹)				(%)
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

3.2. Caractéristiques chimiques du fumier utilisé

Le fumier est riche en azote ($N = 3,42 \text{ g.kg}^{-1}$), bien pourvu en matière organique ($C = 30,00 \text{ g.kg}^{-1}$) et bien décomposé ($C/N = 8,77$). Cette valeur, inférieure à 10 (**Tableau I**), indique que le fumier est un véritable engrais organique sans effet amendement^[25, 26]. Le rapport C/N diminue avec la taille des différentes fractions organiques. Cette réduction serait indicatrice d'un accroissement du degré d'humidification des produits organiques^[27]. Le potentiel fertilisant du fumier utilisé s'apprécie à travers les valeurs de la somme des bases (3,18 %) et des oligo-éléments ($Fe = 1240 \text{ mg.kg}^{-1}$, $Zn = 260 \text{ mg.kg}^{-1}$). Son potentiel hydrogène permet de certifier que le fumier est une substance alcaline ($pH = 7,9$) selon^[23]. Ce potentiel fertilisant est aussi caractérisé par une teneur en phosphore (1645 mg.kg^{-1}) moyennement élevée^[23].

3.3. Effets résiduels des deux types d'engrais sur la fertilité des sols

L'analyse des effets résiduels du fumier sur la fertilité du sol a été focalisée sur deux facteurs décisifs notamment le calcium échangeable et le phosphore assimilable qui expliquent, de façon très nette, chacune des composantes de rendement du riz dans les ferralsols de la station CNRA de Man.

3.3.1. Calcium échangeable

Les teneurs en calcium du sol ont varié de 1,30 à 4,09 cmol.kg^{-1} suivant les traitements (**Tableau IV**). Sans engrais minéraux, le fumier a accru ces teneurs de 1,89 à 2,92 cmol.kg^{-1} (**Tableau IV**). Les taux d'accroissement, en comparaison avec le témoin T00, vont de 29,45 à 100 %, respectivement, pour 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 à T00. Associé à la demi-dose d'engrais chimiques, le fumier a fait varier les teneurs en calcium du sol de 1,85 à 4,09 cmol.kg^{-1} (**Tableau IV**). Les taux de bonification, par rapport à T00, sont compris entre 26,71 et 180 %, respectivement, pour 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 chimiques, le fumier a fait osciller les teneurs en cet élément entre 2 et 2,86 cmol.kg^{-1} (**Tableau IV**), soit des taux d'accroissement de 37 à 96 %, respectivement, pour 5 et 15 t.ha^{-1} . L'apport de 20 t.ha^{-1} de matière organique (T04) et sa

combinaison avec la demi-dose d'engrais chimiques (T09) sont les plus propices à la genèse de bonnes conditions de fixation du calcium par le sol. Aussi, ces 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. Dans les ferralsols en général, le calcium est le cation dominant. Aussi, la corrélation entre les teneurs en calcium et celles de la somme des cations basiques échangeables reste-t-elle très forte conformément aux résultats de^[28].

3.3.2. Phosphore assimilable

Les effets induits des traitements sur le phosphore se sont traduits par des valeurs comprises entre 16,50 et 100,75 mg.kg^{-1} (**Tableau IV**). Sans engrais minéraux, le fumier a accru les teneurs en phosphore du sol. 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 éventuelle erreur d'échantillonnage commise par les techniciens sur le terrain ou au laboratoire.

Les apports de 15 et 20 t.ha^{-1} de fumier parviennent à une teneur identique de 75 mg.kg^{-1} (**Tableau IV**). 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 fixation du phosphore par le sol. Ainsi, les valeurs ont évolué de 33,5 à 100,75 mg.kg^{-1} (**Tableau IV**). Les taux de majoration, consécutifs à cette évolution, 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 IV**) 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, conformément à cet objet, a été nettement améliorée, voire sextuplée, par rapport au témoin T00. Le seuil minimum de phosphore Olsen-Dabin, tel que proposé par^[29, 30], est de 60-70 mg.kg^{-1} . La synergie des deux types d'engrais indique qu'à Man, le sol a un fort pouvoir fixateur vis-à-vis du phosphore. 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^[31, 32]. Le phosphore constitue l'un des trois éléments majeurs indispensables à l'alimentation des cultures et un facteur limitant sérieusement la production agricole surtout dans les ferralsols^[27]. Les techniques de gestion de la fertilité, fréquemment adoptées par les agriculteurs en Afrique, conduisent fatalement à un épuisement rapide des sols^[33]. 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^[34]. La totalité de la matière organique d'origine animale se minéralise et le phosphore organique issu du fumier passe sous forme minérale^[28]. Cette minéralisation pourrait expliquer l'accroissement spectaculaire (510,61 %) du phosphore assimilable observé sous l'effet d'apport de fumier en T09.

3.4. Effets résiduels du fumier sur les composantes de rendements du riz

3.4.1 Rendement en grains

Le rendement paddy du riz a oscillé entre 2,89 et 5,00 t.ha⁻¹ selon les traitements (**tableau V**). Les résultats d'analyse de variance ont décelé des différences significatives entre les moyennes des traitements, imputables à l'interaction entre les deux types d'engrais (P = 0,019). Sans engrais minéraux, l'effet résiduel du fumier a amélioré le rendement qui a évolué de 3,84 à 4,66 t.ha⁻¹ (**tableau V**). Les taux d'accroissement ont alors été égaux à 32,87 et 61,25 %, pour des quantités de 5 et 20 t.ha⁻¹ de fumier. En présence de la demi-dose d'engrais chimiques, le rendement assignable aux doses de fumier a marqué une variation irrégulière de 3,79 à 4,36 t.ha⁻¹ (**tableau V**). Au-delà de 10 t.ha⁻¹ de fumier, une réduction sensible de la production de paddy a été observée. Aussi, les taux d'augmentation, imputables au fumier, ont-ils été relativement faibles. Ils n'ont varié que de 44,29 à 50,87 % par rapport à T00, pour des apports de 5 et 10 t.ha⁻¹ de fumier. Avec des apports de 15 et 20 t.ha⁻¹, des taux d'accroissement modestes de 31,14 et 41,18 ont été acquis. Dans le cadre des traitements issus de la combinaison de la dose complète d'engrais minéraux et de fumier, l'évolution du rendement en grains, attribuable aux doses de fumier, variant de 3,98 à 5,00 t.ha⁻¹, semble plus satisfaisante (**tableau V**). En conséquence, les taux d'accroissement ont

fluctué de 37,72 à 73 %, pour des apports de 5 à 15 t.ha⁻¹ de fumier.

3.4.2. Rendement en matière sèche

La matière sèche produite par le système végétal aérien du riz a oscillé entre 5,13 et 12,78 t.ha⁻¹ (**tableau V**). Des différences significatives entre les moyennes des traitements, imputables à l'interaction entre les deux facteurs étudiés s'est également confirmée (P = 0,0364). Dans le premier groupe de traitements, où la production de matière sèche totale est régie spécifiquement par l'influence résiduelle du fumier, le rendement en matière sèche a évolué de 7,48 à 10,15 t.ha⁻¹, avec les doses de fumier (**tableau V**). Aussi, les taux d'amélioration par rapport à T00 sont-ils passés de 44,25 à 97,86 %, pour des apports de 5 et 20 t.ha⁻¹ de cette matière organique. Au niveau du deuxième groupe de traitements, dans lequel la production de matière sèche est sous la dépendance conjointe de la demi-dose d'engrais chimiques et de fumier, le rendement en matière sèche a progressé de 8,90 à 10,40 t.ha⁻¹ (**tableau V**). Les taux d'accroissement ont maintenu la même tendance à la hausse précédemment observée. Mais cette fois, ils ont oscillé entre 73,49 et 102,73 %, pour des apports de 10 et 20 t.ha⁻¹ de fumier. Dans le dernier groupe de traitements où la production de matière sèche est sous la dépendance simultanée de la dose complète d'engrais minéraux et de fumier, le rendement en matière sèche est passé de 9,63 à 12,78 t.ha⁻¹, pour des apports respectifs de 5 et 15 t.ha⁻¹ de fumier (**tableau V**). La tendance à la hausse des taux d'accroissement de la matière sèche, imputable au fumier, s'est confirmée. Des augmentations plus nettes de 87,72 et 149,12 %, en comparaison avec T00, sont acquises. La troisième série d'objets présente la dose de 15 t.ha⁻¹ de fumier comme étant l'optimum de ce facteur. L'augmentation des rendements en grains et en matière sèche par le fumier implique une amélioration générale des conditions physique, chimique et biologique des sols. Il s'agit, selon^[35], de l'ultime avantage agronomique à utiliser le fumier. Les teneurs du sol en phosphore assimilable, en carbone organique total et en azote total semblent déterminer le rendement paddy. Les résultats obtenus font ressortir clairement l'effet positif de la combinaison des fumures minérale et organique sur le rendement paddy quelle que soit la quantité de substrat organique apportée^[35].

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

Groupe objets	Traitements expérimentaux	Phosphore assimilable (mg.kg ⁻¹)	Taux Phosphore (%)	Calcium échangeable. cmol(+).kg ⁻¹	Taux Calcium (%)
1	T00	16,50 c	0	1,46 bc	0
	T01	30,75 de	86,36	1,89 bc	29,45
	T02	28,00 de	69,70	2,34 bc	60,27
	T03	75,25 abc	356,06	2,55 abc	74,66
	T04	75,50 abc	357,58	2,92 abc	100,03
2	T05	17,00 e	3,03	1,30 c	10,96
	T06	33,50 de	103,03	1,85 bc	26,71
	T07	34,50 de	109,09	1,90 bc	30,14
	T08	69,0 abc	318,18	3,21 ab	119,86
	T09	100,75 a	510,61	4,09 a	180,14
3	T10	27,25 de	65,15	2,01 bc	37,67
	T11	42,0 cde	154,55	2,00 bc	36,99
	T12	58,67 abc	255,58	2,72 abc	86,30
	T13	84,50 ab	412,12	2,86 abc	95,89
	T14	78,40 abc	375,15	2,56 abc	75,34
Moyenne générale		51,50		2,37	
PPDS 5 %.		24,80		1,00	
CV %		33,40		29,35	
Signification		HS		S	

PPDS = Plus petite différence significative ; CV = Coefficient de variation.

HS = Significatif au seuil de 1 % ; S = Significatif au seuil de 5 %.

Taux = Taux d'accroissement. Les taux d'accroissement ont été calculés par rapport à T00.

Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

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

Série d'objets	Traitements expérimentaux	Rendement en grains (t.ha ⁻¹)	Taux d'accroissement (%)	Matière en sèche (t.ha ⁻¹)	Taux d'accroissement (%)
1	T00	2,89 bc	0,0	5,13 e	0,0
	T01	3,84 ab	32,87	7,48 cde	45,81
	T02	3,77 ab	30,47	7,40 cde	44,25
	T03	3,86 ab	33,56	8,48 cd	65,30
	T04	4,66 a	61,25	10,15 bc	97,86
2	T05	2,60 c	-10,03	6,16 de	20,08
	T06	4,42 a	44,29	9,45 bc	84,21
	T07	4,36 a	50,87	8,90 bc	73,49
	T08	3,79 ab	31,14	9,24 bc	80,12
	T09	4,08 a	41,18	10,4 bc	102,73
3	T10	4,26 a	47,40	9,02 bc	75,83
	T11	3,98 ab	37,72	9,63 bc	87,72
	T12	4,49 a	50,87	10,41 bc	101,56
	T13	5,00 a	73,01	12,53 a	149,12
	T14	4,71 a	63,67	12,01 ab	128,65
Moyenne générale		4,04		9,09	
PPDS 5 %		0,76		1,78	
CV %.		13,50		13,52	
Signification		S		S	

PPDS = Plus petite différence significative ; CV = Coefficient de variation ;

S = significatif au seuil de 5 %. Taux d'accroissement calculés par rapport à T00.

Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

3.5. Diagnostic des déficiences primaires du sol

3.5.1. Diagnostic des carences selon le rendement en grains du riz

L'étude des données du rendement couplée à celles du sol, a permis de découvrir que deux éléments nutritifs du ferralsol (le calcium et le phosphore) expliquent bien le rendement paddy. Les coefficients de détermination (R^2) affichés sont élevés et oscillent entre 0,56 et 0,62. Ils expriment que, dans des proportions de 56 et 62 % des cas, le rendement paddy est déterminé, dans les ferralsols de la station CNRA de Man, respectivement, par le calcium échangeable (**figure 1b**) et le phosphore assimilable (**figure 1a**). D'autres facteurs de l'environnement (climat, fertilité intrinsèque du sol) sont crédités de 38 à 44 % des variations observées du rendement. Cependant, les figures présentent des effets dépressifs et des niveaux optima qui nécessitent d'être définis tant pour les facteurs décisifs que pour les rendements. Ainsi, l'optimum du phosphore s'est établi à 68 mg.kg^{-1} pour un rendement maximum de $4,46 \text{ t.ha}^{-1}$ (**figure 1a**). De même, l'extrémum du calcium s'est fixé à $3,00 \text{ cmol.kg}^{-1}$ avec un rendement maximum de $4,52 \text{ t.ha}^{-1}$ (**figure 1b**).

3.5.2. Diagnostic des carences selon la matière sèche totale du riz

A l'instar du rendement en grains, la matière sèche du système végétal aérien du riz, dont l'étude a également été couplée à celle des données du sol, traduit de façon analogue que les mêmes éléments nutritifs déficients du ferralsol expliquent, de manière harmonieuse, cette dernière composante. Les coefficients de détermination (R^2) affichés sont relativement plus élevés que précédemment et varient de 0,57 à 0,68. Ils annoncent que, dans 57 et 68 % des cas, la matière sèche totale du système végétal aérien

du riz est déterminée, dans les ferralsols de la station CNRA de Man, respectivement, par le calcium échangeable (**figure 2b**) et le phosphore assimilable (**figure 2a**). Pour cette composante, d'autres facteurs de l'environnement (climat, fertilité intrinsèque du sol) sont crédités de 32 à 43 % des variations de la matière sèche. A l'instar du rendement en grains, les figures spécifiques du rendement en matière sèche totale du riz présentent des effets dépressifs et des niveaux optima. Ces optima des facteurs décisifs et du rendement en matière sèche ont également été définis. L'optimum du phosphore s'est établi à $85,6 \text{ mg.kg}^{-1}$ pour un rendement en matière sèche maximum de $11,09 \text{ t.ha}^{-1}$ (**figure 2a**). L'extrémum du calcium s'est fixé à $3,34 \text{ cmol.kg}^{-1}$ avec un rendement en matière sèche maximum de $10,79 \text{ t.ha}^{-1}$ (**figure 2b**).

Le phosphore assimilable et le calcium échangeable constituent les facteurs déficitaires du sol. Ces éléments nutritifs du ferralsol, qui expliquent absolument bien les composantes de rendement du riz, forment des facteurs limitants primaires de la production. Ces résultats corroborent avec ceux de [31] qui affirme que le phosphore est le nutriment le plus limitant, comparé à l'azote et au carbone. Cependant, le phosphore et le calcium sont déjà connus, en zone forestière de Côte d'Ivoire, comme des facteurs limitants de la production [24]. 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 conformément à la loi du minimum ou d'interaction [36]. Et, tant que la correction du facteur le plus limitant n'est pas réalisée, les actions sur les autres sont peu efficaces [36]. Le fumier, riche en phosphore (1645 mg.kg^{-1}), a corrigé la carence du sol ($16,5 \text{ mg.kg}^{-1}$) en cet élément. Suite à la correction du premier facteur déficient, c'est le second, le calcium, qui a pris sa place [37].

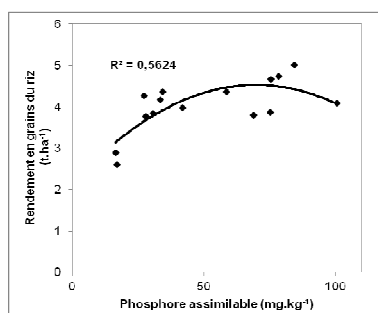


Figure 1a: Modèle d'évolution du rendement en grains du riz en fonction du phosphore assimilable

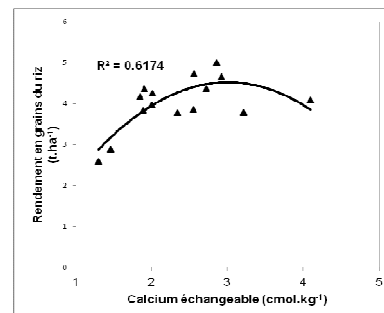


Figure 1b: Modèle d'évolution du rendement en grains du riz en fonction du calcium échangeable

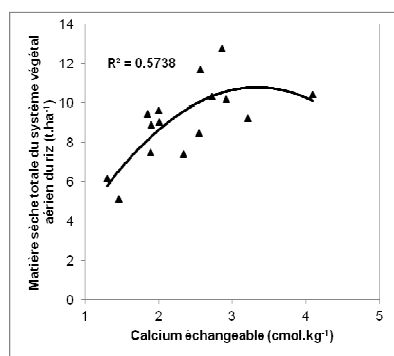


Figure 2a: Modèle d'évolution de la matière sèche du riz en fonction du phosphore assimilable

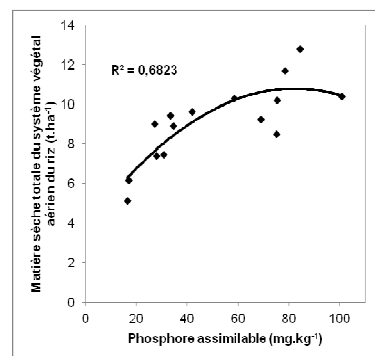


Figure 2b: Modèle d'évolution de la matière sèche du riz en fonction du calcium échangeable

Les résultats fournis par les composantes de rendement du riz sont cohérents pour authentifier l'existence des mêmes facteurs décisifs du ferralsole.

4. Conclusion

Les résultats de cette étude montrent l'intérêt indéniable de combiner des engrais minéraux au fumier pour améliorer la fertilité des sols et les composantes de rendement du riz. L'apport de 15 t.ha⁻¹ constitue l'optimum de ce facteur. L'utilisation croisée des données soutenant les composantes de rendement et celles du sol, certifie que le plan factoriel utilisé a pleinement joué son rôle en parvenant à la mise en évidence des principaux facteurs influents du milieu, optimisant ainsi la réponse attendue. L'analyse des fonctions de production du riz confirme, de façon cohérente, que le phosphore et le calcium expliquent nettement les composantes de rendement étudiées. La persistance de faibles rendements des cultures, dans les différentes zones agro écologiques, trouve en ce concept une explication cohérente des facteurs déficients, mis en évidence par les fonctions de production du riz. Elles certifient qu'après des apports de fertilisants, les carences persistent et demeurent très actives. En conséquence, il semble opportun de persuader des optima de ces facteurs déficients à prendre en compte dans la formulation de l'engrais. Leur connaissance et leur mise en application permettraient de parvenir à une correction effective des carences décelées en vue d'une gestion durable de la fertilité et de la production de riz dans la zone agro-écologique de l'étude. Le but à atteindre est la mise

en place de systèmes cultureux innovants et durables. Les conditions pour y parvenir sont connues : (i) un optimum du phosphore assimilable de 85,6 mg.kg⁻¹ est souhaité pour aboutir à des rendements maxima de 4,46 et 11,09 t.ha⁻¹, respectivement, de paddy et de matière sèche totale ; (ii) un extrémum du calcium échangeable de 3,34 cmol.kg⁻¹ est à respecter pour acquérir des rendements maxima de 4,52 et 10,79 t.ha⁻¹, respectivement, de paddy et de matière sèche totale. En définitive, la formule de fumure propice à ce ferralsole et à la culture de riz doit honorer des seuils de teneurs de 85,6 mg.kg⁻¹ de phosphore et de 3,34 cmol.kg⁻¹ de calcium. Ce faisant, une levée effective des carences primaires serait acquise souscrivant ainsi à des rendements maxima de 4,52 et 11,09 t.ha⁻¹, respectivement, de paddy et de matière sèche totale du système végétal aérien du riz. Les bases complètes d'une formulation efficace d'engrais, adaptée à cette zone agro-écologique d'étude et à la culture de riz, pouvant témoigner d'une gestion durable de la fertilité des sols, de l'accroissement des rendements et de la sédentarisation des systèmes de cultures à base de riz, sont ainsi établies.

5. Références bibliographiques

- [1] Banque Mondiale, Côte d'Ivoire. Un Agenda pour la Croissance Basée sur les Exportations et les Ressources Naturelles. Rapport n° 62572-CI, 2012, 97 p.
- [2] Firca, La filière riz. A la découverte du programme de productivité agricole en Afrique de l'ouest (PPAO/WAAPP). Bulletin d'Information du Fonds Interprofessionnel pour la Recherche et le Conseil Agricoles : La filière du progrès. Acte 7, 2011, Abidjan, 40 p.
- [3] Reuler H.V., Nutrient management over extended cropping

- periods in the shifting cultivation system of South-West Côte d'Ivoire. Thesis Wageningen University, 1996, 189 p
- [4] Fallavier P., Physico-chimie des sols tropicaux acides, in : Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides 1995
- [5] Palm C. A., Myers R. J. K., S. M. Nandwa, Combined use organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment pp 123-165, in: R. J. Buresh, P. A. Sanchez, F. Calhoun (editors.), Replenishing soil fertility in Africa, 1997, 158 p.
- [6] Boko A., Recherche sur l'amélioration de la teneur en matière organique des sols du Bénin. Bul. Rech. Agron (1992) 3 : 29-38.
- [7] Gros A., Engrais – Guide pratique de la fertilisation. 6ème édition. La Maison Rustique. Paris, 1974 436 p.
- [8] Akanza PK., Yoro G. 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. Afr (2003) 3 : 135-144.
- [9]. Kouadio B.H., Insécurité climatique et géorisques en Afrique de l'Ouest : apport des systèmes d'information géographique et de la télédétection à l'étude des phénomènes de risques naturels dans la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse 3^e cycle, université de Cocody, 2001.
- [10] Boyossoro HK., Koffi FK., Bachir MS., Biémi J., Traoré I., Insécurité climatique et géorisques en Côte d'Ivoire : étude du risque d'érosion hydrique des sols dans la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Science et changements planétaires/Sécheresse. (2007) 18, 1: 29-37.
- [11] Anonyme, Catalogue officiel des variétés de riz. Minagra. Edition 2002; Abidjan, 39 p.
- [12] Anderson JM; Ingram JSI, Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods. 2nd ed. Wallingford, UK: CAB International 1993.
- [13] Walkley A, Black IA. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chronic acid titration method. Soil Sci., (1934) 37, 29-38.
- [14] Payne R., A guide to Anova and Design. GenStat Discovery Nairobi (Kenya), ICRAF, 2007, 113 p.
- [15] Vilain M., La production végétale, La maîtrise technique de la production, Agriculture d'aujourd'hui. Sciences, Techniques, Applications, Editions Lavoisier. Paris, 1993, 449 p.
- [16] Bado B.V; TapsobA M; Kambire SH. Efficacité agronomique de l'azote sur le riz pluvial au Burkina Faso, 1997, 17 p.
- [17] Diallo L., Effet de l'engrais azoté et du fumier sur les rendements du maïs. Mémoire d'Ingénieur du développement rural. Université de Bobo-Dioulasso, 2002, 71 p.
- [18] Giroux M, Lemieux M. Comparaison de différentes méthodes d'évaluation de la fertilité azotée des sols et détermination de la dose N optimale du maïs ensilage. Agrosolutions (2006) 17, 39-50
- [19] Delaunois A., Ferrie Y., Bouche M., Colin C., Rionde C, Guide pour la description et l'évaluation de la fertilité des sols, 28 p. 2008. E-mail : accueil@tarn.chambagri.fr. Consulté le 25/12/15
- [20] Anonyme, Analyse et interprétation des résultats d'analyse des sols, 2014, 10 p. www.institut-numerique.org. Date de consultation : 25/12/2015
- [21] Anonyme, Classification des sols. Rapport d'exécution DCGTx. Abidjan, 1967, 63 p.
- [22]. Perraud A, Les sols p. 269-390. In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire, Mémoire ORSTOM n° 50, Editions ORSTOM, 1971, Paris.
- [23] Zro Bi G., Yao-Kouamé A, Kouamé KF. Evaluations statistique et spatiale de la fertilité rizicole des sols hydromorphes (gleysols) de la région du Bélier (Côte d'Ivoire). Tropicultura (2012) 4, 236-242.
- [24] Gigou J. L'importance de la carence en phosphore pour les cultures annuelles en Côte d'Ivoire. Agronomie Tropicale (1987) 42, 20-28.
- [25] Morisseau L., Etude du marché des fertilisants organiques. Publication ITAVI, ITP, OFIVAL. www.inra.fr. Paris, 2005, 54 p.
- [26]. Levasseur P, Aubert C. Contexte, atouts et faiblesses des effluents porcins et avicoles destinés à être exportés. pascal.levasseur@itp.asso.fr Techniporc (2006) 2, 3-11.
- [27] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. Eur. J. Soil Sci. (2001) 52, 345-353
- [28] Rabeharisoa R. L., Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphate des sols ferrallitiques des hautes terres de Madagascar. Thèse de Doctorat d'Etat. Université d'Antananarivo, 2004, 214 p.
- [29] Le Buaneq, B. et Saint-Amand, R. D., 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. Annales de l'Université d'Abidjan, (1975), Série C, tome 11 : 103-122.
- [30]. Moussa S ; Mahamadou G ; Amadou B, Tabo, R., 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, 2012, Niger, 5 p.
- [31] Barroin J. Phosphore, azote, carbone...du facteur limitant au facteur de maîtrise. Le courrier de l'Environnement INRA (2004) 52, 1-52.
- [32] Yemefack M, Nounamo L, Njomgang R, Bilong P. Influence des pratiques agricoles sur la teneur en argile et autres propriétés agronomiques d'un sol ferrallitique au sud du Cameroun. Tropicultura, (2004) 22, 3-10.
- [33] Diouf A, Diop TA, Ndiaye,MAF, Ndiaye AS, Gueye M. Impact de la biomasse de *Gliricidia sepium* utilisée comme engrais vert sur la culture du maïs (*Zea mays*) au Sénégal. Journal of Sciences (2008) 8, 10-17.
- [34] Charland M., Recherche sur les avantages à utiliser le compost. Dossier CRIQ 640-PE27158(R1). Rapport final, 2001, 49 p
- [35]. Segda Z, Yaméogo LP, Gnankambary Z, Sedogo MP. Effets induits du type de fumure sur les paramètres chimiques du sol et sur le rendement paddy dans la plaine rizicole de Bagré au Burkina Faso. J. Soc. Ouest-Afr. Chim (2013) 36, 35-46.
- [36]. Liebig J., Chimie appliquée à la physiologie végétale et à l'agriculture. Traduit de l'Allemand par Gerhardt Ch., Edition Masson, 1841, Paris 544 p.
- [37] Dugue P.; Gigou J., La gestion de la fertilité. In : Mémento de l'Agronome. Editions Jouve. 2002. Paris, 810 p