

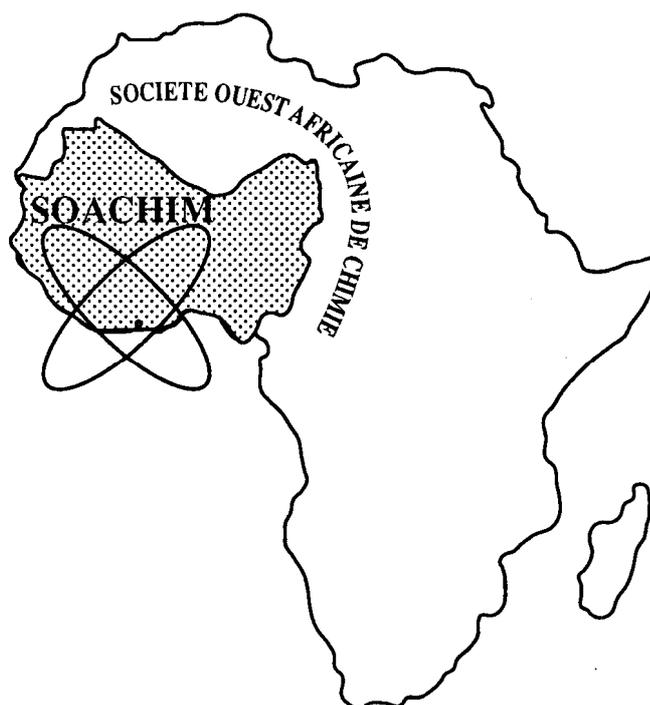
# *Effets de l'engrais sur la fertilité, la nutrition et le rendement du maïs : incidence sur le diagnostic des carences du sol*

**Paul Kouadjo Akanza, et Annicet Hugues N'Da**

## *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*

*J. Soc. Ouest-Afr. Chim.*(2018), 045 : 54 - 66

23<sup>ème</sup> Année, Juin 2018



ISSN 0796-6687

Code Chemical Abstracts : JSOCF2

Cote INIST (CNRS France) : <27680>

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

## **Effets de l'engrais sur la fertilité, la nutrition et le rendement du maïs : incidence sur le diagnostic des carences du sol**

**Paul Kouadjo Akanza,<sup>1\*</sup> et Annicet Hugues N'Da<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), 01 BP 1 740 Abidjan 01 Côte d'Ivoire ;  
tél : (225) 02 02 10 94/09 09 91 34

**(Reçu le 18/10/2017 – Accepté après corrections le 13/08/ 2018)**

**Résumé :** Une expérience sur la fertilisation minérale du maïs a été menée à la station CNRA de Ferkessédougou. Elle a mis en jeu deux types d'engrais : un témoin fertilisé avec le NPK 15 15 15 ou engrais coton et un engrais NPK 23 10 05 spécifique au maïs. Le dispositif utilisé est un bloc de Fisher à quatre répétitions comportant un facteur étudié à sept niveaux. Le matériel végétal utilisé est la variété EV 8728 de maïs. Des analyses de sols et de végétaux, effectuées dans le cadre de cet essai, montrent que l'engrais n'a eu aucun effet significatif sur la fertilité du sol. Au niveau de la nutrition du maïs, seule l'alimentation phosphorée s'est avérée significative. L'analyse du rendement du maïs établit que les deux formules d'engrais présentent des efficacités de productivité équivalente. Le principe du diagnostic des déficiences minérales du sol a permis de mettre en évidence l'existence de cinq facteurs limitatifs du rendement. Ce sont des carences vraies et induites composées de deux éléments majeurs (azote, phosphore), d'un élément secondaire (calcium) et de deux oligo-éléments (cuivre, zinc). Ces éléments qui expliquent parfaitement bien le rendement sont des facteurs limitants du sol de la station CNRA de Ferkessédougou. Ces résultats établissent les bases complètes d'une formulation efficace d'engrais minéraux, adaptée à cette zone agro-écologique. L'avantage du diagnostic et de la correction effective des déficiences, consiste en la prévention de toute transmission de carence à l'homme par le végétal à travers l'alimentation. La carence en zinc est reconnue aujourd'hui comme un véritable problème de santé publique.

**Mots-clés :** Engrais minéraux, Nutrition, Rendement, Maïs, Déficiences, Côte d'Ivoire

## **Effects of fertilizers on fertility, the nutrition and the yield of the corn: impact on the diagnosis of the soil deficiencies**

**Abstract :** An experiment on mineral fertilization of corn led to the CNRA of Ferkessédougou station. It put into play two types of fertilizer: a witness fertilized with the NPK 15 15 15 or cotton fertilizer and maize-specific fertilizer NPK 23 10 05. The device is a block of Fisher to four repetitions with a factor studied at seven levels. The plant material used is the EV 8728 of corn variety. In this trial, of soils and plants, analyses show that the fertilizer had no significant effect on the fertility of the soil. At the level of nutrition in maize, only phosphoree food proved to be significant. The analysis of the performance of maize establishes that two forms of fertilizer have equivalent productivity efficiencies. The principle of diagnosis of mineral deficiencies in the ground helped to highlight the existence of five limiting factors of performance. These are real and induced deficiencies composed of two major elements (nitrogen, phosphorus), a secondary element (calcium) and two trace elements (copper, zinc). These elements that perfectly explain the performance are factors limiting the CNRA of Ferkessédougou station ground. These results establish the complete basis for an efficient formulation of mineral fertilizers, adapted to the agro-ecological zone. The advantage of diagnosis and effective correction of deficiencies, is the prevention of any transmission of deficiency in humans by the plant through feeding. Zinc deficiency is recognized today as a real public health problem.

**Key words :** Mineral fertilizers, Nutrition, Yield, Corn, Deficiencies, Ivory Coast

---

\* Auteur correspondant : [paul.akanza@yahoo.com](mailto:paul.akanza@yahoo.com)

## 1. Introduction

Les éléments nutritifs du sol, qu'ils soient majeurs, secondaires ou mineurs, sont importants pour la croissance, le développement et la productivité des végétaux<sup>[1]</sup>. Les sols carencés en certains éléments nutritifs, suite à leur dégradation, peuvent défavoriser le développement végétatif et réduire ainsi la qualité du produit<sup>[2; 3]</sup>. La productivité initiale des sols tropicaux d'Afrique est, en général faible, et baisse davantage au cours des années de culture avec la diminution de la teneur en éléments nutritifs<sup>[1]</sup>. La consommation d'engrais minéraux en Afrique est nettement inférieure à 10 kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> alors que 5 à 10 fois plus serait nécessaire pour accéder à une productivité permettant l'atteinte de l'autosuffisance alimentaire<sup>[4]</sup>. La fumure minérale est une des solutions d'amélioration chimique des sols proposée pour la compensation des pertes en nutriments et la correction des carences observées au niveau des systèmes de production<sup>[5]</sup>. Or, l'accroissement spectaculaire des productions vivrières en Côte d'Ivoire, s'accomplit, sans aucune mutation technologique, au détriment de la forêt<sup>[6]</sup>. La carence en certains éléments est une situation d'insuffisance de ces éléments nutritifs caractérisée par l'apparition de symptômes<sup>[7]</sup>. On distingue ainsi des carences vraies et des carences induites. La carence vraie est le résultat d'un manque de l'élément dans le sol. Cette insuffisance peut être naturelle ou consécutive à l'action épuisante des cultures précédentes. La carence induite survient lorsque l'élément est présent en quantité suffisante, mais la plante se trouve dans l'impossibilité d'en faire l'absorption. Faute de fertilisation équilibrée, la plante montre des signes de déficience qui peuvent se manifester par une décoloration apparente, une croissance réduite et une vulnérabilité aux maladies. Si la carence n'est pas corrigée, la plante réagit par une croissance réduite ou meurt<sup>[7]</sup>. Aussi, l'apparition fréquente de symptômes de déficiences minérales sur le maïs dénote-t-elle 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. Face à ce constat, la politique agricole ivoirienne a été axée sur la promotion de productions vivrières durables en vue de contribuer à la sécurité alimentaire<sup>[6; 8]</sup>. Une des voies, pour répondre à l'impératif du maintien du niveau de fertilité et de durabilité des systèmes de cultures à base de maïs, consiste en un diagnostic de l'ensemble des carences minérales limitant la nutrition et les rendements. Et l'analyse de végétaux

constitue une aide avérée puisque la plante demeure le meilleur indicateur de l'efficacité des pratiques de fertilisation<sup>[9; 10]</sup>. Le diagnostic et la levée réels des carences primaires du sol s'imposent comme une absolue nécessité<sup>[11]</sup>. Et le rendement du maïs apparaît comme l'une des composantes fondamentales témoignant de l'existence des facteurs déficients du milieu. Le présent article vise à évaluer les effets d'un engrais spécifique du maïs, "Yara Mila Activa", sur la fertilité des sols, la nutrition minérale et les composantes de rendement. Il se propose aussi d'en déduire des relations fondamentales sol-plante souscrivant à une définition des facteurs limitatifs du sol dont la correction et la maîtrise pourraient coopérer à la durabilité des systèmes culturaux à base de maïs dans la zone agro-écologique des savanes du Nord du pays.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Matériel

#### 2.1.1. Site d'étude

L'étude a été réalisée à la station CNRA de Ferkessedougou (longitude 5,1 °W, latitude 9,4 ° N), chef-lieu de la région du Tchologo dans le district des savanes au Nord de la Côte d'Ivoire.

#### 2.1.2. Climat

La région jouit d'un climat caractérisé par un vent sec (harmattan), venant du Sahara, qui souffle de décembre à mars. Le climat présente deux saisons distinctes : une saison pluvieuse d'avril à octobre et une saison sèche de novembre à mars. La température moyenne annuelle de 24 ° C, varie de 12 °C en décembre-janvier à 39 °C en mars-avril. La pluviométrie moyenne annuelle, qui est de 1200 mm, traduit un régime pluviométrique monomodal.

#### 2.1.3. Végétation

La végétation est de type soudanais et sub-soudanais avec une savane plus ou moins ligneuse et des forêts galeries<sup>[12]</sup>. Les espèces typiques rencontrées dans la région sont : le karité (*Vitellaria paradoxa*), le néré (*Parkia biglobosa*) et *Faidherbia albida*.

#### 2.1.4. Sol

Le sol du site de l'essai est de type limono-sablo-argileux caractérisé par une capacité d'échange cationique très faible à l'instar de sa teneur en

matière organique et un pH tournant autour de 6,45<sup>[4]</sup>.

### 2.1.5. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est la variété EV 8728 de maïs. C'est une variété à pollinisation libre, d'un cycle intermédiaire de 100-105 jours. Les grains sont de couleur jaune avec une texture dentée. Les principales caractéristiques de la variété sont : (i) tolérance à la striure ; (ii) tolérance à la verse racinaire. Son potentiel de rendements moyens est compris entre 3 et 5  $\text{tha}^{-1}$ .

## 2.2. Méthodes

### 2.2.1. Dispositif expérimental et traitements

L'essai a été conduit suivant un dispositif en bloc de Fisher à un facteur étudié en quatre répétitions. Les engrais minéraux constituent le facteur étudié (**tableau 1**). Ce sont : (i) NPK 15 15 15 spécifique au cotonnier et (ii) Yara Mila Activa NPK 23 10 05 spécifique au maïs. Sept traitements générant six expériences et un témoin absolu sans engrais (T0) ont été préconisés par la firme de distribution des engrais minéraux YARA (**tableau I**).

### 2.2.2. Fertilisation

Les apports d'engrais ont été effectués, conformément aux recommandations de YARA, en deux étapes : (i) application localisée à la base du poquet et enfouissement des engrais, au stade 10 JAS, pour la fumure de fond et (ii) au stade 30 JAS pour les engrais de couverture.

## 2.3. Collecte des échantillons de sol, de végétaux

### 2.3.1. Echantillons de sol

Un prélèvement de sol, de l'horizon superficiel exploité par les racines (0-30 cm) a été effectué

dans chaque parcelle à la tarière. Constitué de 28 échantillons composites, ils ont été analysés au laboratoire Yara Lancrop au Royaume Uni.

### 2.3.2. Echantillons de végétaux

Les prélèvements ont concerné le tiers médian des feuilles à l'aisselle desquelles se situe l'épi principal de maïs. Ils ont été effectués au stade floraison femelle<sup>[13; 14; 15]</sup>. Le tiers médian retenu de chaque feuille a été débarrassé de sa nervure principale. Les teneurs en éléments minéraux, des différentes parties prélevées de la feuille de l'épi à la floraison femelle, se présentent comme suit : le limbe symbolise 70 % du poids de la feuille entière, mais 90 % des éléments, en particulier l'azote, s'y trouvent concentrés<sup>[15]</sup>. Le tiers médian de la feuille sans la nervure centrale est donc plus concentré en éléments que la partie limbe de la feuille entière, ce qui justifie son choix.

## 2.4. Analyses chimique et statistique

### 2.4.1. Sol

Les caractéristiques chimiques du sol ont été déterminées par diverses méthodes. La méthode à l'acétate d'ammonium 1 M à pH 7<sup>[16]</sup> a été utilisée pour déterminer les teneurs en bases échangeables (Ca, Mg, K). Le carbone organique total a été déterminé selon la méthode de Walkley et Black<sup>[17]</sup>. Le phosphore assimilable a été déterminé à l'aide du bicarbonate de sodium ( $\text{NaHCO}_3$ ) 0,5M à pH = 8,5. Le dosage de l'azote est effectué par la méthode Kjeldahl. L'objectif visé par les analyses de sol était de juger des améliorations apportées par l'engrais au sol et aux composantes de rendement du maïs en vue de l'établissement de relations fondamentales sol-plante.

**Tableau I** : Traitements expérimentés ou formules et doses de fumure comparées entre elles.

Symbole	Fumure de fond	Engrais de couverture
T0	0	0
T1	200 $\text{kg ha}^{-1}$ de NPK 15-15-15	100 $\text{kg ha}^{-1}$ d'Urée
T2	200 $\text{kg ha}^{-1}$ de NPK 15-15-15	100 $\text{kg ha}^{-1}$ d'Urée
T3	100 $\text{kg ha}^{-1}$ de NPK 23-10-05	200 $\text{kg ha}^{-1}$ de NPK 23-10-05
T4	100 $\text{kg ha}^{-1}$ de NPK 23-10-05	150 $\text{kg ha}^{-1}$ de NPK 23-10-05
T5	100 $\text{kg ha}^{-1}$ de NPK 23-10-05	200 $\text{kg ha}^{-1}$ de NPK 23-10-05 200 $\text{kg ha}^{-1}$ de NPK 23-10-05
T6	150 $\text{kg ha}^{-1}$ de NPK 23-10-05	

### 2.4.2. Végétaux

Les 28 échantillons de végétaux ont également été analysés dans le même laboratoire Yara Lancrop au Royaume Uni. Après minéralisation, le dosage de l'azote a été effectué par la méthode Kjeldahl. S'agissant du phosphore et du potassium, ils ont, respectivement, été dosés par la méthode Olsen-Dabin et par spectrométrie à flamme. La méthode d'analyse par spectrométrie d'absorption atomique est celle qui a servi au dosage du calcium et du magnésium.

### 2.4.3. Analyse statistique

Toutes les données collectées ont été soumises à l'analyse de variance selon le logiciel GenStat [18]. La comparaison multiple des moyennes, en cas de différences significatives, est le résultat du test de Scheffe, appliqué au seuil de 5 %.

### 2.5. 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 [19; 20] 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 T0 ;  $\alpha$ , un coefficient traduisant l'efficacité de l'engrais ;  $\beta$ , 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 [21].

$$\text{On obtient alors : } \delta R / \delta X = R' = - 2\beta X + \alpha \quad (2);$$

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

La valeur  $\alpha/2\beta$  constitue la dose optimale de l'élément nutritif décisif du sol garantissant un rendement maximum.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Caractéristiques physiques et chimiques du sol du site

Les propriétés physiques et chimiques du sol de la station CNRA de Ferkessedougou sont connues (tableau II). Au regard de sa composition (46,96% de limons, 39,66% de sables et 13,38% d'argile), ce sol est d'une texture limono-sablo-argileuse. C'est un sol qui appartient à la classe des sols ferrallitiques [22].

Les propriétés chimiques de ce sol témoignent d'un faible potentiel de fixation et d'échange d'éléments si l'on en juge de la somme des cations basiques échangeables ( $1211,1 \text{ cmolkg}^{-1}$ ) et de la capacité d'échange cationique très faible ( $7,15 \text{ méq}/100\text{g}$ ). Sa teneur en matière organique est aussi très faible ( $2,57 \text{ mgkg}^{-1}$ ). En effet, la MO du sol, de par sa relation étroite avec la fertilité, est un des facteurs importants pour la maîtrise d'une productivité végétale durable [23]. Par ailleurs, les concentrations en phosphore, en calcium et en zinc pour des valeurs respectives de  $8 \text{ mgkg}^{-1}$ ,  $952 \text{ cmolkg}^{-1}$  et  $3,77 \text{ mgkg}^{-1}$  indiquant un sol très pauvre [23] pourraient manifester des principales carences minérales de ce sol ferrallitique. Le pH qui s'est établi à 6,45 indique un sol peu acide au regard de la norme de 6,5 [23].

**Tableau II** : Caractéristiques physico-chimiques du sol du site avant l'implantation de l'essai

Paramètres	Eléments analysés	Station CNRA
Paramètres physiques	Argile (%)	13,38
	Sables (%)	39,66
	Limons (%)	46,96
Paramètres chimiques	pH	6,45
	Sodium ( $\text{cmolkg}^{-1}$ )	13,83
	Potassium ( $\text{cmolkg}^{-1}$ )	99,67
	Magnésium ( $\text{cmolkg}^{-1}$ )	145,5
	Calcium ( $\text{cmolkg}^{-1}$ )	952
	Zinc ( $\text{mgkg}^{-1}$ )	3,77
	Phosphore ( $\text{mgkg}^{-1}$ )	8,00
	CEC ( $\text{méq}/100\text{g}$ )	7,15
MO ( $\text{mgkg}^{-1}$ )	2,57	

### 3.2. Effets des engrais sur la fertilité du sol

Toutes les caractéristiques chimiques du sol du site se sont avérées non significatives au seuil de 5 % (**tableau III**). Cependant, dans le cadre du présent article, l'analyse des effets des engrais sur la fertilité du sol a été focalisée sur quatre facteurs décisifs notamment le calcium, l'azote, le zinc et le cuivre qui expliquent, de façon très nette, le rendement du maïs dans les sols ferrugineux de la station CNRA de Ferkessédougou.

#### 3.2.1. Azote

Les concentrations azotées du sol ont varié de 0,38 à 0,52 gkg<sup>-1</sup> en fonction des traitements éprouvés (**tableau III**). L'analyse de variance n'a pu mettre en évidence des différences significatives (P = 0,171) entre les moyennes des traitements. Le témoin absolu T0 affiche donc une teneur statistiquement égale à celle des objets expérimentés. La valeur la plus basse, relativement, de cette variable, est celle du témoin absolu T0, tandis que la plus forte relève de T1.

Tous les objets à base d'engrais NPK 23 10 05 ont accru les teneurs en azote du sol. Cela pourrait se justifier par la concentration en azote de ladite formule. Les taux d'accroissement ont fluctué entre 14,47 et 34,74% par rapport au témoin absolu T0. Quant aux témoins relatifs fertilisés (T1 et T2), ils ont pu générer des taux d'augmentation des teneurs en azote du sol compris entre 21,84 et 36,84% en comparaison du témoin T0 (**tableau III**). Au regard des taux d'azote définis, la valeur de N inférieure à

0,75 indique un sol très pauvre au plan agronomique <sup>[23]</sup>.

#### 3.2.2. Zinc

Les teneurs en zinc du sol ont oscillé entre 1,03 et 1,70 mgkg<sup>-1</sup> en fonction des traitements étudiés (**tableau III**). L'analyse de variance n'a encore pu mettre en évidence l'existence de différences significatives (P = 0,100) entre les moyennes des traitements pour le zinc. Les valeurs des teneurs en zinc du sol, inférieures à la norme de 4,1 mgkg<sup>-1</sup>, sont résolument très faibles et pourraient indiquer que cet élément constitue l'une des carences minérales des cultures vivrières annuelles en particulier le maïs.

Tous les objets éprouvés ont rehaussé les concentrations en zinc du sol comprises entre 0,1 et 0,67 mgkg<sup>-1</sup> ce qui correspond à des taux d'accroissement de 9,81 et 65,05 % en comparaison du témoin absolu T0. Avec un taux d'amélioration, en comparaison du témoin absolu T0, supérieur à 50%, l'objet T5 s'identifie comme étant, relativement, le meilleur vis-à-vis de l'accroissement en zinc du sol. Selon <sup>[24]</sup>, aux fortes concentrations, le zinc devient toxique, ce qui justifie l'appellation de micropolluant toxique.

#### 3.2.2. Cuivre

Les concentrations en cuivre du sol ont fluctué entre 2,58 et 3,33 mgkg<sup>-1</sup> en fonction des traitements (**tableau III**). L'analyse de variance n'a décelé aucune différence significative (P = 0,808) entre les moyennes des traitements.

**Tableau III** : Effets des engrais sur quelques caractéristiques chimiques du sol et taux d'accroissement.

Traitements	Azote (gkg <sup>-1</sup> )	Taux (%)	Zinc (mgkg <sup>-1</sup> )	Taux (%)	Cuivre (mgkg <sup>-1</sup> )	Taux (%)
T0	0,38 a	-	1,03 a	-	2,58 a	-
T1	0,52a	36,84	1,18 a	14,56	2,77 a	07,36
T2	0,46 a	21,84	1,13 a	09,81	2,90 a	12,40
T3	0,43 a	14,47	1,63 a	58,25	3,27 a	26,74
T4	0,43 a	13,68	1,25 a	21,36	2,82 a	09,30
T5	0,43 a	14,47	1,70 a	65,05	3,33 a	29,07
T6	0,51 a	34,74	1,48 a	43,69	2,77 a	07,36
Moyenne générale	0,45	-	1,34	-	2,92	-
CV %	16,5	-	26,7	-	19	-
Effets engrais	NS	-	NS	-	NS	-

CV = Coefficient de variation ; NS = Non significatif. Taux (%) = Taux d'accroissement, calculés par rapport au témoin absolu T0. Les moyennes d'une même colonne suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Tous les objets à base d'engrais induisent une relative amélioration des teneurs en cuivre du sol. Les écarts par rapport à T0 évoluent de 0,19 à 0,75 mgkg<sup>-1</sup> et correspondent à des taux d'accroissement de 7,36 à 29,07 %. Inférieures à la norme, les teneurs en cuivre du sol apparaissent essentiellement faibles et pourraient indiquer que cet élément constitue l'une des carences minérales des cultures vivrières annuelles en particulier le maïs [24]. A l'instar du zinc, aux fortes concentrations, le cuivre devient autant toxique, ce qui justifie l'appellation de micropolluant toxique [24].

### 3.3. Effets des engrais sur la nutrition minérale du maïs

#### 3.3.1. Nutrition phosphorée

Les concentrations en phosphore des feuilles de maïs, au stade floraison femelle, ont été comprises entre 0,23 et 0,35 % MS en fonction des traitements (tableau IV). Ces teneurs en phosphore des feuilles de maïs par rapport à la matière sèche sont conformes à celles des données relatives aux concentrations foliaires du maïs provenant du laboratoire d'analyse des végétaux [25]. Des différences hautement significatives (P = 0,008) ont été décelées entre les moyennes des traitements selon l'analyse de variance. Les deux témoins fertilisés avec du NPK 15 15 15 (T1 et T2) appartiennent au même groupe de tête que les quatre objets évalués (T3, T4, T5 et T6) à base de NPK 23 10 05. Quant au témoin absolu T0, il forme tout seul le second groupe. Cette répartition des objets pourrait traduire une équivalence de performance vis-à-vis de la nutrition phosphorée du maïs des deux types d'engrais. Le plus fort taux d'accroissement (52,17 %) des teneurs en

phosphore des feuilles du maïs procède de l'objet T1 correspondant à 200 kg.ha<sup>-1</sup> de NPK 15 15 15 (fumure de fond) et à 100 kg.ha<sup>-1</sup> d'urée (fumure de couverture). Quant aux autres traitements (T2, T3, T4, T5 et T6), leurs taux d'accroissement des teneurs en phosphore des feuilles similaires, s'établissent entre 30,43 et 39,13 % (tableau IV). Le phosphore est l'un des éléments majeurs les plus importants du sol du site et constituerait l'une des principales déficiences limitant la nutrition des cultures vivrières annuelles de la région et par conséquent leurs rendements [26]. Dans les agroécosystèmes, seulement quelques kilogrammes de phosphore sont présents en solution dans les sols, sous forme directement assimilables par la plante [26].

#### 3.3.2. Nutrition azotée du maïs

Les teneurs en azote des feuilles de maïs, au stade floraison femelle, ont été comprises entre 3,19 et 3,56% MS en fonction des traitements étudiés (tableau IV). L'analyse de variance n'a pu mettre en évidence aucune différence significative entre les moyennes des traitements (P = 0,105). Tous les objets manifestent une nutrition azotée comparable du maïs. Vis-à-vis de cette nutrition azotée du maïs, les deux formules d'engrais comparés (NPK 15 15 15 et NPK 23 10 05) n'établissent aucune différence significative entre elles. Par conséquent, une parfaite similarité par rapport à l'alimentation azotée du maïs est confirmée. Cependant, deux objets se signalent par une relative amélioration de la nutrition azotée du maïs. Ce sont T4 et T5 qui ont permis d'accroître la nutrition azotée du maïs, respectivement, de 0,33 et 0,37% MS en comparaison avec le témoin T0, ce qui correspond à des taux d'amélioration de 10,34 et 11,60%.

**Tableau IV** : Effets des engrais sur la nutrition phosphorée et azotée du maïs et taux d'accroissement

Traitements	Phosphore (% MS)	Taux (%)	Azote (% MS)	Taux (%)
T0	0,23 b	0	3,19 a	0
T1	0,35 a	52,17	3,35 a	5,02
T2	0,31 a	34,78	3,20 a	0,31
T3	0,30 a	30,43	3,37 a	5,64
T4	0,30 a	30,43	3,52 a	10,34
T5	0,32 a	39,13	3,56 a	11,60
T6	0,31 a	34,78	3,41 a	6,90
Moyenne générale	0,30	-	3,37	-
CV %	11,4	-	9,2	-
Effet engrais	**	-	NS	-

CV = Coefficient de variation ; NS = Non significatif ; \*\* = Significatif au seuil de 1 %. Les taux d'accroissement et/ou de réduction sont calculés par rapport au témoin absolu T0. Les moyennes d'une même colonne suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes.

### 3.4. Effets des engrais sur le rendement du maïs

Le rendement en grains, à 15% d'humidité du maïs, a oscillé entre 1856 et 3178 kgha<sup>-1</sup> en fonction des traitements (**tableau V**).

L'analyse de variance a permis de déceler des différences hautement significatives (P = 0,013) entre les moyennes des rendements selon les traitements. Les objets se répartissent en deux groupes distincts: (i) les six objets à base d'engrais, constituent le premier groupe ; (ii) le témoin absolu T0 forme, à lui seul, le second et dernier groupe. Bien que les objets soient statistiquement égaux, le traitement T5 (100 kgha<sup>-1</sup> de fumure de fonds plus 200 kgha<sup>-1</sup> de fumure de couverture) sous forme de NPK 23 10 05, se révèle relativement plus intéressant que les autres vis-à-vis de la productivité du maïs (**tableaux I et V**). Il a accru le rendement de 1322 kgha<sup>-1</sup> par rapport au témoin absolu T0, ce qui représente l'accroissement le plus important de 71,23 %. Tous les taux d'accroissement du rendement, fournis par les objets à base des deux formules de fumures testées, sont supérieurs ou égaux à 50 % (**tableau V**). Le rendement du maïs démontre, selon les résultats (**tableau V**), que les deux formules d'engrais (NPK 15 15 15 et NPK 23 10 05) présentent une efficacité équivalente en matière de fertilisation du maïs. L'objectif d'accroître le rendement du maïs d'au moins 25% par rapport à T0 est donc totalement atteint car les taux d'accroissement des objets fertilisés ont varié de 50,27 à 71,23 % en comparaison avec T0

(**tableau V**). Les rendements acquis demeurent néanmoins faibles en comparaison avec ceux, culminant à 5-6 tha<sup>-1</sup>, acquis à Man, dans l'Ouest du pays, avec la même variété de maïs, dans une expérience de fertilisation organo-minérale mettant en jeu du fumier de volaille et de l'engrais minéral NPK 10 18 18 <sup>[27]</sup>. Cette faiblesse des rendements de l'essai pourrait s'expliquer par des effets conjugués d'éventuels facteurs limitants notamment des carences vraies ou induites <sup>[8]</sup> du sol ferrugineux de la station CNRA de Ferkessedougou.

### 3.5. Diagnostic des carences minérales du sol

La mise en application du principe de diagnostic des déficiences minérales du sol et de l'étude des fonctions de production du maïs a permis d'établir des ajustements linéaires et quadratiques significatifs avec le rendement du maïs <sup>[19; 20]</sup>. Le principe du diagnostic des déficiences minérales du sol et de l'étude des fonctions de production ont été appliqués, respectivement au phosphore, au calcium, à l'azote ainsi qu'aux oligoéléments (cuivre et zinc) du sol.

### 3.6. Diagnostic des carences minérales du sol

La mise en application du principe de diagnostic des déficiences minérales du sol et de l'étude des fonctions de production du maïs a permis d'établir des ajustements linéaires et quadratiques significatifs avec le rendement du maïs <sup>[19; 20]</sup>.

**Tableau V** : Rendement à 15 % d'humidité du maïs et taux d'accroissement

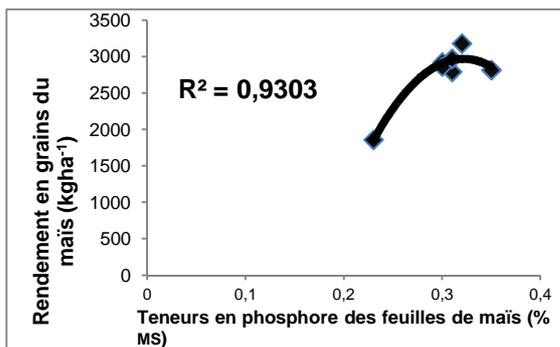
Traitements	Rendement grains à 15% H (kgha <sup>-1</sup> )	Taux d'accrois. (%)
T0	1856 b	-
T1	2815 a	51,67
T2	2789 a	50,27
T3	2918 a	57,22
T4	2860 a	54,09
T5	3178 a	71,23
T6	2969 a	59,97
Moyenne générale	2769	-
CV %	15,7	-
Effet engrais	**	-

Taux d'accrois. = Taux d'accroissement par rapport à T0 ; CV = Coefficient de variation ; H = Humidité; \*\* = Significatif au seuil de 1 %. Les taux d'accroissement sont calculés par rapport au témoin absolu T0. Les moyennes d'une même colonne suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes

Le principe du diagnostic des déficiences minérales du sol et de l'étude des fonctions de production ont été appliqués, respectivement au phosphore, au calcium, à l'azote ainsi qu'aux oligoéléments (cuivre et zinc) du sol.

### 3.6.1. Diagnostic des carences selon les teneurs en phosphore des feuilles

Les teneurs en phosphore des feuilles à l'aisselle desquelles apparaît l'épi principal de maïs dont l'étude a été couplée à celles du rendement, révèlent que les concentrations en phosphore des feuilles de maïs établissent des ajustements linéaire et quadratique significatifs avec la productivité de cette céréale. Le coefficient de détermination affiché  $R^2 = 0,93$  (**figure 1**) est très élevé. Il explique que dans 93 % des cas, le rendement du maïs est déterminé par la nutrition phosphorée du maïs, dans les sols de la station CNRA de Ferkessédougou. Cette variable, qui développe parfaitement bien le rendement, constitue l'un des facteurs limitants de la nutrition du maïs et par conséquent de toutes les cultures vivrières dans cette région. La courbe représentative des données du rendement du maïs en fonction de celles des teneurs en phosphore des feuilles, expose un niveau optimum suivi d'un effet dépressif (**figure 1**). Ces conditions imposent la définition de l'optimum du facteur décisif de la nutrition phosphorée et du rendement : (i) l'optimum des teneurs en phosphore des feuilles s'est établi à 0,32 % MS pour un rendement maximum du maïs de 2967  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (**figure 1**).



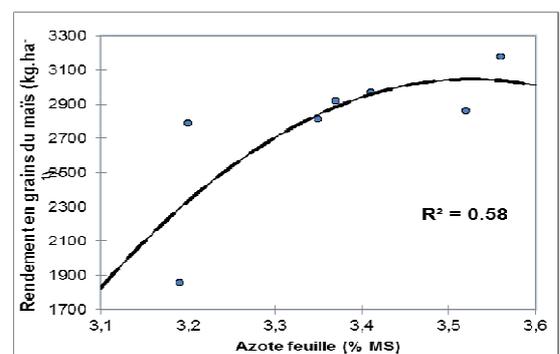
**Figure 1** : Modèle d'évolution du rendement du maïs en fonction des teneurs en phosphore des feuilles

L'effet des concentrations en phosphore des feuilles sur le rendement du maïs est de type quadratique et il s'atténue à mesure que ces teneurs augmentent. Ce résultat corrobore parfaitement ceux de [28]. En outre, ces auteurs [29] instruisent que les carences en phosphore disponible, dans les sols acides

des pays d'Afrique, des Caraïbes et du Pacifique, limitent la production agricole, en raison de la fixation marquée et de la réduction des niveaux de phosphore dans les sols de ces régions. Ils prônent l'utilisation de sources organiques et non organiques pour améliorer la disponibilité de cet élément et suggèrent l'utilisation de germoplasmes végétaux résistants à la toxicité aluminique pour faciliter l'acquisition du phosphore. Deux obstacles se posent toutefois aux prélèvements de P par les plantes. D'une part, les ions phosphatés doivent aller à l'encontre d'un gradient de concentration. Cela nécessite qu'ils passent d'une solution dans le sol ayant des concentrations variant entre 0,01 à 0,1 mM à la plante dont les cellules des racines possèdent des concentrations en P de 5 à 20 mM [26].

### 3.6.2. Diagnostic des carences selon les teneurs en azote des feuilles

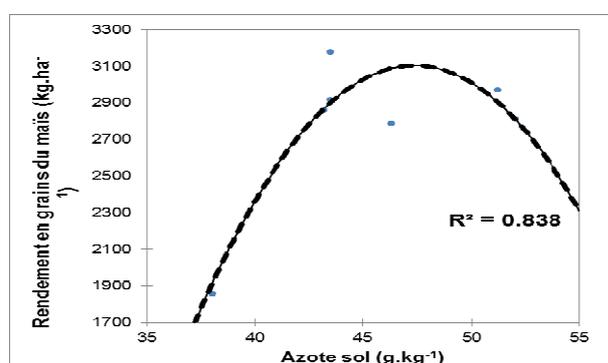
A l'instar du phosphore, l'étude des teneurs en azote des feuilles, à l'aisselle desquelles apparaît l'épi principal de maïs, a été couplée à celles du rendement. Il en résulte que les concentrations azotées des feuilles de maïs établissent des ajustements linéaire et quadratique significatifs avec la productivité de cette céréale. Le coefficient de détermination appposé,  $R^2 = 0,58$  (**figure 2**), indique que dans 58% des cas, le rendement en grains du maïs est déterminé par les teneurs en azote en sol de la station CNRA de Ferkessédougou. Cette variable, qui explique exactement le rendement, constitue l'un des facteurs limitant de la production du maïs et de toutes les cultures vivrières. La courbe représentative, des données du rendement du maïs en fonction des teneurs en azote du sol, présente encore un niveau optimum suivi d'un effet dépressif (**figure 2**). Cette condition ordonne de définir l'optimum du facteur décisif du sol et du rendement. L'optimum des teneurs en azote s'est authentifié à 3,53 % MS pour une productivité maximum du maïs de 3047  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .



**Figure 2** : Modèle d'évolution du rendement du maïs en fonction des teneurs en azote des feuilles

### 3.6.3. Diagnostic des carences selon les teneurs en azote du sol

Les teneurs en azote du sol, dont l'étude a encore été couplée aux données du rendement du maïs, révèlent que les valeurs de cette variable établissent des ajustements linéaire et quadratique significatifs avec la productivité du maïs. Le coefficient de détermination affiché  $R^2 = 0,84$  est élevé (**figure 3**). Il interprète que dans 84 % des cas, le rendement du maïs est déterminé par les teneurs en azote, dans les sols ferrugineux de la station CNRA de Ferkessédougou. Ces teneurs azotées, qui expliquent parfaitement bien le rendement, constituent l'un des facteurs limitants de la production du maïs et des cultures vivrières. La courbe représentative du rendement en fonction des teneurs en azote du sol expose encore un niveau optimum suivi d'un effet dépressif (**figure 3**). Ces exigences prescrivent de définir l'optimum du facteur décisif du sol et du rendement. L'optimum des teneurs en azote s'est établi à  $47 \text{ gkg}^{-1}$  pour un rendement maximum de maïs estimé à  $3105 \text{ kgha}^{-1}$ . La carence repérée au niveau de la nutrition minérale du maïs s'explique bien par celle mise en évidence dans le sol. Nos résultats en relation avec la déficience de l'azote sont authentifiés par ceux de [30]. Ces auteurs témoignent que l'effet des contraintes de l'environnement sur la croissance végétale indique que l'azote pourrait être l'un des facteurs les plus limitants de la production végétale. Et bien qu'il soit possible d'augmenter la productivité de certains sols au moyen d'engrais azotés, les faibles bénéfices économiques qui en découlent font que la fertilisation est impossible dans plusieurs conditions. La déficience en azote est une situation d'insuffisance de cet élément nutritif caractérisée par l'apparition de symptômes [7].



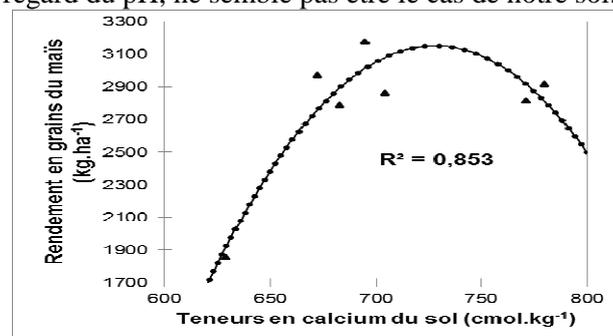
**Figure 3 :** Modèle d'évolution du rendement du maïs en fonction des teneurs en azote du sol

Deux types de carences sont connus : les carences vraies et les carences induites. La carence vraie résulte d'un manque d'azote dans le sol. Cette

insuffisance peut être naturelle ou acquise à la faveur de l'action épuisante des cultures précédentes. La carence induite, par contre, survient lorsque l'azote est présent en quantité suffisante, mais la plante se trouve dans l'impossibilité d'en faire l'absorption.

### 3.6.4. Diagnostic des carences selon les teneurs en calcium du sol

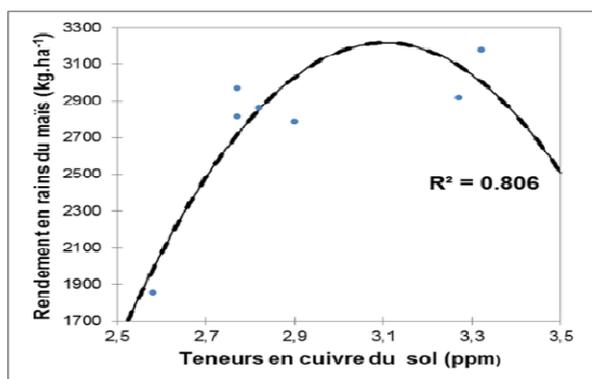
Les teneurs en calcium du sol, dont l'étude a été une fois de plus couplée à celles du rendement, ont admis d'établir des ajustements linéaire et quadratique significatifs avec la productivité du maïs. Le coefficient de détermination affiché  $R^2 = 0,85$  est élevé (**figure 4**). Il exprime que dans 85% des cas, le rendement du maïs est déterminé par les teneurs en calcium, dans les sols de la station CNRA de Ferkessédougou. Cette variable, qui explique parfaitement le rendement, constitue l'un des facteurs limitants de la production du maïs et de toutes les cultures vivrières. La courbe représentative, des données du rendement du maïs en fonction des teneurs en calcium du sol, formule également un niveau optimum suivi d'un effet dépressif (**figure 4**). Cette situation prescrit de définir l'optimum du facteur décisif du sol et du rendement. L'optimum des teneurs en calcium s'est confirmé à  $728 \text{ cmolkg}^{-1}$  pour un rendement maximum du maïs de  $3163 \text{ kgha}^{-1}$ . Le calcium intervient dans l'alimentation des plantes mais il agit surtout sur les propriétés physiques du sol (stabilité structurale, dynamique de l'eau). Le maintien ou l'amélioration des propriétés physiques des sols est primordial pour que s'exprime le potentiel de productivité, en particulier lors de l'implantation des cultures. Dans les deux cas le calcium nécessaire est apporté par les amendements minéraux basiques. Par ailleurs, la bonne efficacité des fumures minérales ne s'obtient que sur des terres ayant une bonne teneur en MO et un statut acido-basique satisfaisant [1] ; ce qui, au regard du pH, ne semble pas être le cas de notre sol.



**Figure 4 :** Modèle d'évolution du rendement du maïs en fonction des teneurs en calcium du sol

### 3.6.5. Diagnostic des carences selon les teneurs en cuivre du sol

Les teneurs en cuivre du sol, dont l'étude a toujours été couplée aux données du rendement du maïs, confirment que ces concentrations établissent des ajustements linéaire et quadratique significatifs avec la productivité de cette céréale. Le coefficient de détermination affiché  $R^2 = 0,81$  (**figure 5**) est élevé. Il détermine que dans 81% des cas, le rendement du maïs est déterminé par les teneurs en cuivre, dans les sols de la station CNRA de Ferkessédougou. Ces teneurs en cuivre, qui expliquent parfaitement bien le rendement, constituent l'un des facteurs limitants de la production du maïs et de l'ensemble des cultures vivrières. Le phénomène récurrent révélé précédemment s'authentifie. En effet, la courbe représentative du rendement en fonction des teneurs en cuivre du sol expose un niveau optimum suivi d'un effet dépressif (**figure 5**).



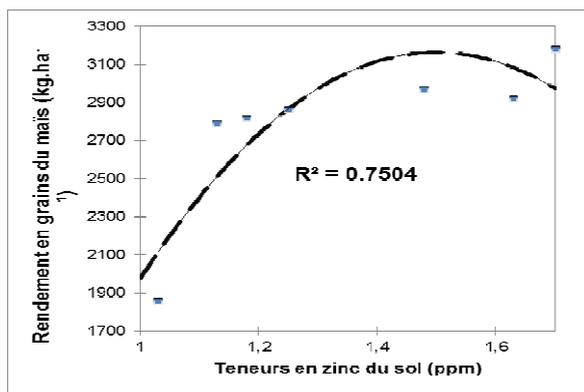
**Figure 5** : Modèle d'évolution du rendement du maïs en fonction des teneurs en cuivre du sol

Ces exigences ont prescrit de définir l'optimum du facteur décisif du sol et du rendement : (i) l'optimum des teneurs en cuivre s'est établi à 3,10 ppm pour un rendement maximum de maïs estimé à 3214  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . En comparaison avec les besoins des cultures, tout indique qu'un contenu du sol de 20 ppm (Cu total) conviendrait pour la majorité des cultures et de 30 ppm pour les cultures les plus exigeantes <sup>[31]</sup>. La carence en Cu fut mise en évidence dans plusieurs pays et pour plusieurs cultures (céréales, arbres fruitiers etc.). Néanmoins, son importance n'a commencé à croître qu'au cours des deux dernières décennies. Cette carence a été notée surtout chez les céréales en sols sableux, en Europe de l'Ouest, en Asie, en Afrique de l'Est <sup>[32]</sup>. La déclaration de l'auteur corrobore les résultats de notre essai portant sur le maïs en sol sableux. La fertilisation cuprique est très liée à la qualité du sol. En effet, plus le sol est fertile, plus il a besoin

d'apport de Cu. De même, dans le contexte d'une agriculture intensive exigeante en engrais, la quantité normale de Cu devient vite insuffisante par rapport aux besoins des plantes <sup>[33]</sup>. Par ailleurs, la carence en Cu est accentuée lors d'une forte fertilisation azotée car l'augmentation de la quantité de fertilisants (N.P.K.) diminue la concentration en Cu dans la plante <sup>[34]</sup>.

### 3.6.7. Diagnostic des carences selon les teneurs en zinc du sol

Le recours au principe du diagnostic des déficiences minérales du sol et de l'étude des fonctions de production a enfin été privilégié pour les teneurs en zinc du sol. Les données de cette variable, dont l'étude a encore été couplée à celles du rendement du maïs, confirment que les concentrations en zinc agréent à l'établissement d'ajustements linéaire et quadratique significatifs avec la productivité de ladite céréale. Le coefficient de détermination affiché  $R^2 = 0,75$  (**figure 6**) est élevé. Il traduit que dans 75% des cas, le rendement du maïs est déterminé par les teneurs en zinc, dans les sols cultivés de la station CNRA de Ferkessédougou. Les teneurs en cet élément, qui expliquent parfaitement bien le rendement, constituent l'un des facteurs limitants de la production de maïs et des cultures vivrières. La courbe représentative du rendement en fonction des teneurs en zinc du sol de la station CNRA exprime bien un niveau optimum suivi d'un effet dépressif (**figure 6**). Ces exigences prescrivent de définir l'optimum du facteur décisif du sol et du rendement. L'optimum des teneurs en zinc s'est confirmé à 1,50 ppm pour un rendement maximum de maïs estimé à 3163  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Notre résultat relatif à la carence en zinc des sols cultivés des savanes du Nord corrobore l'affirmation de <sup>[35]</sup> selon laquelle plus de la moitié des sols dédiés à l'agriculture dans le monde, ont un déficit naturel en zinc. Ainsi, les carences en zinc transmises à l'homme, à travers l'alimentation, par des végétaux, constituent un véritable problème de santé publique. En effet, un régime composé de noix, de céréales brutes et de légumes contient un zinc qui est moins aisément assimilable par l'organisme. Cette difficulté d'absorption est due à la présence de composés synthétisés par les plantes, liant très fortement les métaux; dans cette condition, le zinc ne peut pas être prélevé au niveau du tube digestif. Sur ce sujet, l'OMS a estimé en 2010, à 450 000 le nombre d'enfants mourant par an des suites d'une carence en zinc <sup>[35]</sup>.



**Figure 6** : Modèle d'évolution du rendement du maïs en fonction des teneurs en zinc du sol

L'ensemble des figures présente des niveaux optima suivis d'effets dépressifs. Ces conditions ont prescrit la définition des optima des facteurs décisifs tant des éléments nutritifs que du rendement : (i) l'optimum du phosphore des feuilles s'est établi à 0,32 % MS pour un rendement maximum de maïs de 2967 kgha<sup>-1</sup> (**figure 1**); (ii) l'apogée de l'azote des feuilles s'est retrouvé à 3,53 % MS pour un rendement maximum de 3047 kgha<sup>-1</sup> (**figure 2**); (iii) le summum de l'azote du sol s'est confirmé à 47 gkg<sup>-1</sup> pour un rendement maximum de 3105 kgha<sup>-1</sup> (**figure 3**); (iv) l'optimum du calcium s'est fixé à 728 cmolkg<sup>-1</sup> avec un rendement maximum de 3163 kgha<sup>-1</sup> (**figure 4**); (v) l'optimum du cuivre s'est assuré à 3,10 ppm pour un rendement maximum de 3214 kgha<sup>-1</sup> (**figure 5**) et enfin, (vi) l'extrémum du zinc s'est authentifié à 1,5 ppm avec un rendement maximum de 3163 kgha<sup>-1</sup> (**figure 6**). Ces éléments nutritifs qui expliquent parfaitement bien le rendement du maïs, constituent des facteurs limitants de la nutrition et du rendement des cultures vivrières dans les sols des savanes du Nord de la Côte d'Ivoire. Les résultats fournis par la productivité du maïs sont cohérents pour authentifier l'existence de ces facteurs déficitaires du sol de la station CNRA de Ferkessedougou. Il s'agit notamment de deux éléments majeurs (P et N), d'un élément secondaire (Ca) et de deux oligo éléments (Cu et Zn). Les valeurs de R<sup>2</sup>, établissant l'intensité et la hiérarchisation des carences, installent le phosphore au premier rang pour R<sup>2</sup> = 0,93 (**figure 1**). Il est suivi, successivement, par le calcium, l'azote et le cuivre avec des coefficients de détermination respectifs de R<sup>2</sup> = 0,85 (**figure 4**), de R<sup>2</sup> = 0,84 (**figure 3**) et de R<sup>2</sup> = 0,81 (**figure 5**). Le zinc, second oligo élément déficitaire, apparaît en cinquième et dernière position avec R<sup>2</sup> = 0,75 (**figure 6**). Ces résultats qui constituent des témoignages authentiques, démontrent bien que le

rendement d'une culture est lié à la dose de chacun des éléments nutritifs décisifs du sol par une fonction de production quadratique [19; 20]. Le principe du diagnostic des carences ne s'est pas limité aux seuls éléments nutritifs du sol mais s'est étendu, dans les conditions de réalisation de cet essai, aux phénomènes physiologiques plus complexes que constituent les nutriments phosphorée et azotée. L'importance des carences minérales a été prouvée en Côte d'Ivoire, grâce à la méthode des essais soustractifs [36]. Elle a permis de déterminer l'azote, le phosphore et le calcium en tant que facteurs limitatifs en région des savanes du Nord du pays. La méthode des essais factoriels, suivie de l'étude de fonctions de production des cultures, semble plus appropriée que la précédente. En effet, celle-ci ne se limite pas aux simples éléments majeurs (NPK) et secondaires (CaMgS). Mais le diagnostic du facteur déficient prend en compte l'ensemble des caractéristiques chimiques du sol, y compris les oligo-éléments. Les moyens pour diagnostiquer le facteur limitant sont nombreux. Parmi eux, citons les tests biologiques de croissance et les indicateurs d'état physiologique [37]. Selon [31], une dose excessive d'un élément fertilisant peut induire une carence au niveau d'un autre élément essentiel à la croissance de la plante. Dans la formule NPK 23 10 05, N semble excessif. Or, l'élément en excès réduit l'absorption de l'autre élément au niveau racinaire ou restreint son transport à l'intérieur de la plante. Ce type de carence, bien qu'il ne soit souvent que temporaire, peut néanmoins affecter significativement la culture. Les carences absolues ou primaires du sol [29; 30] limitent la nutrition des cultures avec des répercussions négatives sur leur pleine expression par rapport au rendement. Nos résultats corroborent avec ceux de [37] qui affirme que le phosphore est le nutriment le plus limitant, comparé à l'azote et au carbone. Cependant, le phosphore, le calcium et l'azote sont déjà connus, dans les sols des savanes du Nord du pays, comme des facteurs limitants de la production [36]. La présente découverte des oligo éléments (zinc, cuivre), en tant que facteurs décisifs, participe à la réactualisation de la liste des carences primaires du sol des savanes du Nord. D'un point de vue biologique, le cuivre et le zinc sont des oligo-éléments. On les retrouve donc dans les tissus végétaux à de plus faibles teneurs que dans les sols. Cependant, aux fortes concentrations, ils deviennent toxiques. Ce phénomène justifie l'appellation de micropolluant métallique [24]. Dans le cadre de cet essai, le principe absolu selon lequel le rendement d'une culture est limité par celui des éléments fertilisants qui le premier vient à manquer, est

établit<sup>[38]</sup>. Ces résultats authentifient que dans le sol d'une zone agro pédoclimatique donnée, plusieurs déficiences sont toujours bien certifiées. La production est limitée par le facteur le plus éloigné de son optimum, conformément à la loi du minimum<sup>[38]</sup>. Et, tant que la correction du facteur le plus limitant n'est pas réalisée, les actions sur les autres sont peu efficaces.

#### 4. Conclusion

Les résultats de cet essai confirment que cinq facteurs du sol (phosphore, calcium, azote, zinc et cuivre) expliquent nettement la productivité du maïs. En dehors des carences en azote, en calcium et en phosphore, déjà connues, les carences les plus marquées concernent le cuivre et le zinc. La persistance de faibles rendements des cultures trouve en ce concept une explication cohérente des facteurs déficients. Elle témoigne qu'après des apports de fertilisants, les carences du sol ne sont pas neutralisées mais persistent et demeurent très actives. En conséquence, il s'est avéré opportun de convaincre des optima des facteurs déficients à prendre en compte dans la formulation des engrais. Leur connaissance et leur prise en compte autoriseraient à parvenir à une correction effective des carences décelées en vue d'une gestion durable de la fertilité et de la production dans la zone agro-écologique de l'étude. Le but à atteindre est la mise en place de systèmes culturaux innovants et durables à base de maïs. Les conditions pour y parvenir sont : (i) un optimum des teneurs en phosphore des feuilles de 0,32 % MS ; (ii) un summum du calcium de 728 cmolkg<sup>-1</sup> ; (iii) un extrémum des teneurs en azote de 47gkg<sup>-1</sup> ; (iv) un optimum des teneurs en cuivre de 3,10 ppm ; (v) un summum des teneurs en zinc de 1,5 ppm. En définitive, la formule de fumure adaptée à ce sol et à la culture de maïs doit honorer les seuils de teneurs ci-dessus indiqués. L'ajustement de la fertilisation, sur cette base ainsi définie, découlerait une levée des carences vraies ou induites souscrivant à des rendements maxima de maïs. Les bases complètes d'une formulation efficiente d'engrais minéraux, adaptée à cette zone agro-écologique des savanes et à la culture de maïs, sont ainsi établies.

#### 5. Références bibliographiques

[1] Anonyme. Eléments fertilisants secondaires et oligoéléments. Parlons-en. UNIFA, Edition 2005, Madagascar, 10 p.

[2] Estivez B. L'importance des éléments mineurs : des carences à la toxicité. Une préoccupation en agriculture biologique ? Edition 2006, Québec.

[3] Anonyme. Gestion des éléments des nutritifs. Les pratiques de gestion optimales. Plan vert Canada-Ontario en agriculture. Edition 2009, Ontario.

[4] Feller C. Les sols tropicaux en semis direct sous couvertures végétales. Communiqué de presse (CD rom). Séminaire international à Madagascar 2007.

[5] Bationo A., Hartemink A., Lungu O., Naimi M., Okoth P., Smaling E. et al., - African soils: their productivity and profitability or fertilizer use. Document de base présenté à l'occasion du sommet africain sur les engrais, Abuja, Nigéria (2006), 9 – 13

[6] Troupa S. G. F. et Koné M. H. Recensement national de l'agriculture 2001 et sécurité alimentaire. Rapport de consultant FAO, EU, Minagra. Abidjan, (2001), 40 p

[7] Lambert J., Tremblay N., Hamel C. H. Nutrition minérale des plantes cultivées. In, TAYEB AMEZIANE E.H.; PERSONS E.; Biologie moderne: Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale. Hatier-AUPELF-UREF, (1994), 269-292.

[8] Djenontin J. A., Wennink B., Dagbenogbakin G. et Ouinkoun G. Pratiques de gestion de fertilité dans les exploitations agricoles du Nord-Bénin. In: (J.Y.) Jamin., (L.) Seiny Boukar, (C.) Floret. (Ed). Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, Garoua, Cameroun (2002), 27-31.

[9] Anonyme. Programme indicatif national pour la période 2014-2020. RCI-UE. 11<sup>ème</sup> Fonds Européen de Développement. Nairobi (2014), 34 p.

[10] Martin-Prével P., Gagnard J. et Gautier P. L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Editions Lavoisier, Paris 1984, 810 p.

[11] Haddad M. La fertilisation de la pomme de terre. Journée fertilisation de la pomme de terre de Djanatu El-Arif (Zawya) du 08/09/2014, (2014) 28 p. [www.ccidahra.com/agrimosta2014](http://www.ccidahra.com/agrimosta2014).

[12] AISA. Le développement agro-pastoral et agro-industriel du Nord de la Côte-d'Ivoire: cas des départements de Korhogo, Boundiali, Ferkessédougou, AISA, Abidjan, 1991, 133 p.

[13] Loué A. Fertilisation minérale du maïs. 2. Diagnostic foliaire du maïs. In Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, (1967) 560-567. Tananarive (Madagascar) du 19-25/11/1967, Edition IRAT, 1968. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:22129>.

[14] Loué A. Maïs. In : (P.) Martin-Prével, (J.) Gagnard et (P.) Gautier (Ed.). L'analyse végétale dans le contrôle des plantes tempérées et tropicales. Edition Lavoisier, 1984, Paris 810 p.

[15] Plénet D. Fonctionnement des cultures de maïs sous contrainte azotée. Détermination et application d'un indice de nutrition. Thèse de Doctorat de l'INPL Nancy (1995) 254 p.

[16] Anderson JM and Ingram JSI. Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods. 2<sup>nd</sup> (Ed.) Wallingford, (1993), UK, CAB International.

- [17] Walkley A, and 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.
- [18] Payne R. A guide to Anova and Design. GenStat Discovery Nairobi (Kenya), ICRAF, 2007, 113 p
- [19] Vilain M. La production végétale, La maîtrise technique de la production, Agriculture d'aujourd'hui. Sciences, Techniques, Applications, Editions Lavoisier. Paris, 1993, 449 p.
- [20] Giroux M. et 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.
- [21] 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.
- [22] Perraud A. Les sols pp. In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, 1971, Paris n° 50, 269-390
- [23] Zro Bi G. F., Yao-Kouamé A. et Kouamé K. F. Evaluation statistique et spatiale de la fertilité des sols hydromorphes (gleysols) de la région du Bélier (Côte d'Ivoire). *Tropicultura* (2012), **30**, 4, 236-242
- [24] Marcato C. E. Origine, devenir et impact du Cu et du Zn des lisiers porcins. Rôle de la digestion anaérobie. Thèse de doctorat de l'INP Toulouse 2007, 199 p.
- [25] Bertrand R. et Gigou J. La fertilité des sols tropicaux. Le technicien d'agriculture tropicale. Editions Maisonneuve et Larose, Paris, 2000, 397 p.
- [26] Frossard E., Julien P., Neyroud J-A. et Sina S. Le phosphore dans les sols. Etat de la situation en Suisse. Cahier de l'environnement (2004), 368p.
- [27] Akanza K P, S. Sanogo et N'da A. H. Influence combinée des fumures organique et minérale sur la nutrition et le rendement du maïs : impact sur le diagnostic des carences du sol. *Tropicultura*, (2016) **34**, 208-220.
- [28] Giroux M., N'Dayegamiye A. et Lemieux M. Effets de l'historique des épandages d'engrais minéraux et organiques et des rotations sur les rendements, les besoins en engrais N du maïs-grain et la fertilité azotée des sols. Cahiers de l'observatoire de la qualité des sols du Québec, 2014, 42 p.
- [29] Kisinyo P.O., W.K. Ng'etich, C.O. Othieno, J.R. Okalebo et W.R. Opile. Épuisement du phosphore : les pays ACP doivent-ils s'en préoccuper ? Quelles sont les perspectives attendues en matière de recherche et de politique ? 2011, 18 p.
- [30] Boulbaba L., Bouaziz S., Mainassara Z. A., Mokhtar H. et Mokhtar L. Effets de la fertilisation azotée, de l'inoculum par *Rhizobium* sp. et du régime des pluies sur la production de la biomasse et la teneur en azote du pois chiche. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ* (2009) **13**, 4, 537-544.
- [31] Leblanc M. La prévention des carences en éléments mineurs et secondaires en sol organique. Agriculture, pêcheries et alimentation. Québec, 2014 49 p. <http://www.mario.leblanc@mapaq.gouv.qc.ca>
- [32] Tahiri R. Le cuivre comme facteur limitatif pour la pomme de terre et l'orge cultivés dans les sols podzoliques recevant de la tourbe ou des engrais organo-minéraux à base de tourbe. Mémoire de Maître ès Sciences. Université Laval, Canada (1997), 77 p.
- [33] Brenan, R.F. Effectiveness of some copper compounds applied as foliar spray in alleviating copper deficiency of wheat grown on copper-deficient soils of Western Australia. *Australian J. Experimental Agric.* (1990), **30**, 687-691.
- [34] Wallace, T. Diagnosis of mineral deficiencies in plants (second edition). Chemical publishing Co. Inc. 1961, 115p.
- [35] Charlier J. B. Des OGM dans nos assiettes pour une meilleure nutrition mondiale en zinc. ATHENA 274. Dossier 2011, 19-21. <http://www.jbcharlier@doct.ulg.ac.be>
- [36] Gigou J. L'importance de la carence en phosphore pour les cultures annuelles en Côte d'Ivoire. *Agronomie tropicale* (1987) **42**, 20-28.
- [37] Barroin J. Phosphore, azote, carbone...du facteur limitant au facteur de maîtrise. Le courrier de l'Environnement INRA (2004) **52**, 1-52.
- [38] Von J. Liebig. Chimie organique appliquée à la Physiologie végétale et à l'Agriculture. Gerhardt C. (trad.), Fortin Masson et Cie, Paris 1841, 437 p.