

Potentiel de fertilité chimique des vergers de cacaoyer *Theobroma cacao* L. (Malvacea) en Côte d'Ivoire

[Chemical fertility potential of orchards of cacao *Theobroma cacao* L. (Malvacea) in Ivory Coast]

N'guessan Kouamé Jean-Claude¹, Akotto Odi Faustin¹, Snoeck Didier², Camara Mameri³, and Yao - Kouamé Albert¹

¹Département des Sciences du sol, Université Félix Houphouët-Boigny, UFR STRM, Abidjan, Côte d'Ivoire

²UR Performance des systèmes de culture des plantes pérennes, CIRAD, Montpellier, France

³CNRA, Abidjan, Côte d'Ivoire

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The study was realized to evaluate the soil fertility potential in cocoa in Côte d'Ivoire. A total of 140 farmers' plots from 14 producing regions were randomly selected for soil sampling in the 0-20 cm horizon. Soil samples for chemical analyses were performed on the following parameters: pH-water, total organic C, total N, available P and exchangeable cations. Both organic C and total N were low. Although, available P was rated high Low. Cation exchange capacity (CEC) was an indication that the soils have low potential for plant nutrients retention. A guided fertilizer usage should be recommended to cocoa farmers to boost the productivity of the cash crop.

KEYWORDS: Cacao, Côte d'Ivoire, Plant nutrition, Productivity, Soil Fertility.

RÉSUMÉ: L'étude a été réalisée dans le but d'évaluer le potentiel de fertilité des sols sous cacaoyers en Côte d'Ivoire. Un total de 140 parcelles d'agriculteurs de 14 régions productrices de cacao a été choisi pour l'échantillonnage du sol dans l'horizon 0-20 cm. Les analyses chimiques des échantillons de sols au laboratoire ont été réalisées sur les paramètres suivants: pH eau, C total, N total, P assimilable, le K, Ca, Mg, le B, Fe, Al, Zn, Cu, Mn et CEC. Les analyses ont montré que, dans tous les sols, le C organique et le N total étaient faibles, que 14 % des sols des cacaoyères prospectées avaient un potentiel de fertilité bas et 79 %, un potentiel de fertilité moyen pour la cacaoculture. Seulement, 7 % des sols ont un potentiel de fertilité élevé pour la cacaoculture.

MOTS-CLEFS: Cacaoyer, Côte d'Ivoire, Fertilité des sols, Nutrition des plantes, Productivité.

1 INTRODUCTION

La majeure partie du cacao produit en Côte d'Ivoire, a longtemps assuré l'offre mondiale à presque 45% [1]. La production, majoritairement assurée par les petits exploitants, a considérablement chuté suite à de nombreuses contraintes ? Ces dernières ayant trait principalement à la détérioration de la qualité des sols qui affecte différents facteurs de la croissance végétale, notamment, l'ensemble des éléments chimiques nécessaires à la plante. Cet état réduit la productivité des plantations et leur rendement [2].

La relance de la filière cacao en déclin et la reconquête de son essor d'antan, nécessitent de se pencher sur la fertilité chimique des sols [3].

Si la littérature rapporte que la mise en valeur d'un sol en cacaoculture en Côte d'Ivoire dépend surtout des caractères morphopédologiques (éléments grossiers, induration et le mauvais drainage interne) [4], il n'en est pas de même pour le potentiel de fertilité chimique des sols sous cacaoyères et dans les conditions pédoclimatiques locales [5]. L'évaluation et la maîtrise de ce facteur s'avèrent donc indispensables.

La prise en compte conjointe des contraintes physiques et chimiques des sols participe de la gestion de la nutrition végétale [6]. Aussi, la présente étude s'est-elle intéressée aux principaux indicateurs de suivi de la fertilité chimique des vergers de cacaoyer : *Theobroma cacao* L. (Malvaceae) en Côte d'Ivoire, à savoir : le statut acido-basique, le statut organique et le statut en éléments nutritifs des sols.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 CADRE DE L'ÉTUDE

L'étude a été conduite dans 14 localités de culture et de production de cacaoyers en Côte d'Ivoire, à savoir : Abengourou, Aboisso, Agnibilékro, Akoupé, Bouaflé, Divo, Gnamienkro, Grand- Béreby, Guéyo, Guiglo, Kragui, Oumé, Sarakagui, et Touih (**Figure 1**). La zone de culture du cacaoyer en Côte d'Ivoire est caractérisée par un climat subéquatorial, à régime bimodal, avec des précipitations moyennes oscillant entre 1200 et 1700 mm par an [1]. La durée d'insolation est supérieure à 1 800 heures par an [7]. Les températures moyennes annuelles varient de 24 à 32 °C [8]. La végétation naturelle était la forêt dense humide et couvrait près de 16 millions d'hectares dans les années 1960. Elle a été surexploitée et il n'en reste plus que des reliques estimées à moins de 3 millions d'hectares [9]. La majorité des sols sont des Ferralsols, Acrisols, Arenosols et Cambisols (ISSS, ISRIC et FAO, 1998). Les caractéristiques pédologiques sont consignées dans le **tableau I**.

2.2 TRAVAUX SUR LE TERRAIN

2.2.1 CHOIX DES PARCELLES

Dans l'optique de couvrir au maximum les diverses conditions agro-écologiques de la cacaoculture des différents sites, 10 parcelles en production, d'âges variant entre 5 et 45 ans, ont été choisies par localité. Ce choix a tenu compte de l'âge moyen des cacaoyers en Côte d'Ivoire qui était de 20 ans en 2001 [1]. Le dispositif a également tenu compte des 4 orientations cardinales (Nord, Sud, Est, Ouest). Les parcelles généralement non fertilisées ou fertilisées 3 ans avant la présente étude, ont été retenues pour l'étude.

2.2.2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODE DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS DE SOLS

L'échantillonnage des sols a été effectué selon un dispositif en randomisation totale dans les horizons 0-20 cm, intensément influencés par la matière organique et reconnus comme source de 70-80 % de l'apport nutritionnel du cacaoyer [10], [11]. Les échantillons de sols trouvés ont été prélevés en 2014, à la tarière. Dans chaque cacaoyère, 30 échantillons (prises) élémentaires de sols par hectare, soit 300 au total par localité ont été prélevés.

Afin d'obtenir des résultats plus représentatifs de la réalité du sol dans chaque localité, 10 échantillons composites ont été constitués à partir d'un mélange des 30 prises élémentaires équipondérales, soit au total 140 échantillons de sols pour l'étude. Le conditionnement des échantillons du sol après le prélèvement sur le terrain a été effectué à la station du CNRA de Divo. Il a consisté d'abord en un séchage, un émottage, un tamisage au tamis de 2 mm (la terre fine) et un ensachage des échantillons de sols. Ensuite, ces échantillons ont été emmenés au laboratoire de la Société Alascienne Développement Étude Fe (SADEF) à Pôle d'Apach en France, où ils ont été de nouveau conditionnés en deux parties. La première partie a été broyée mécaniquement pour l'obtention de la terre fine destinée à la détermination du carbone organique et de l'azote organique totaux, puis, la seconde partie, non broyée, consacrée à la mesure et au dosage des autres propriétés chimiques des sols.

3 ANALYSE EN LABORATOIRE

Les analyses chimiques réalisées selon les méthodes standards [12], ont concerné la (15) variables quantitatives : pH eau, Carbone (C), azote (N), Phosphore assimilable (P_{ass}), K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , B^+ , Fe^{2+} , Al^{3+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Mn^+ , capacité d'échange

cationique (CEC), taux de saturation en bases (V). Le carbone déterminé a été multiplié par 1,724 pour estimer la matière organique. Les données chimiques ont été interprétées sur la base des travaux de [11]. L'échelle des mesures de la fertilité chimique du sol est basée sur [13] dont le détail figure dans le tableau II.

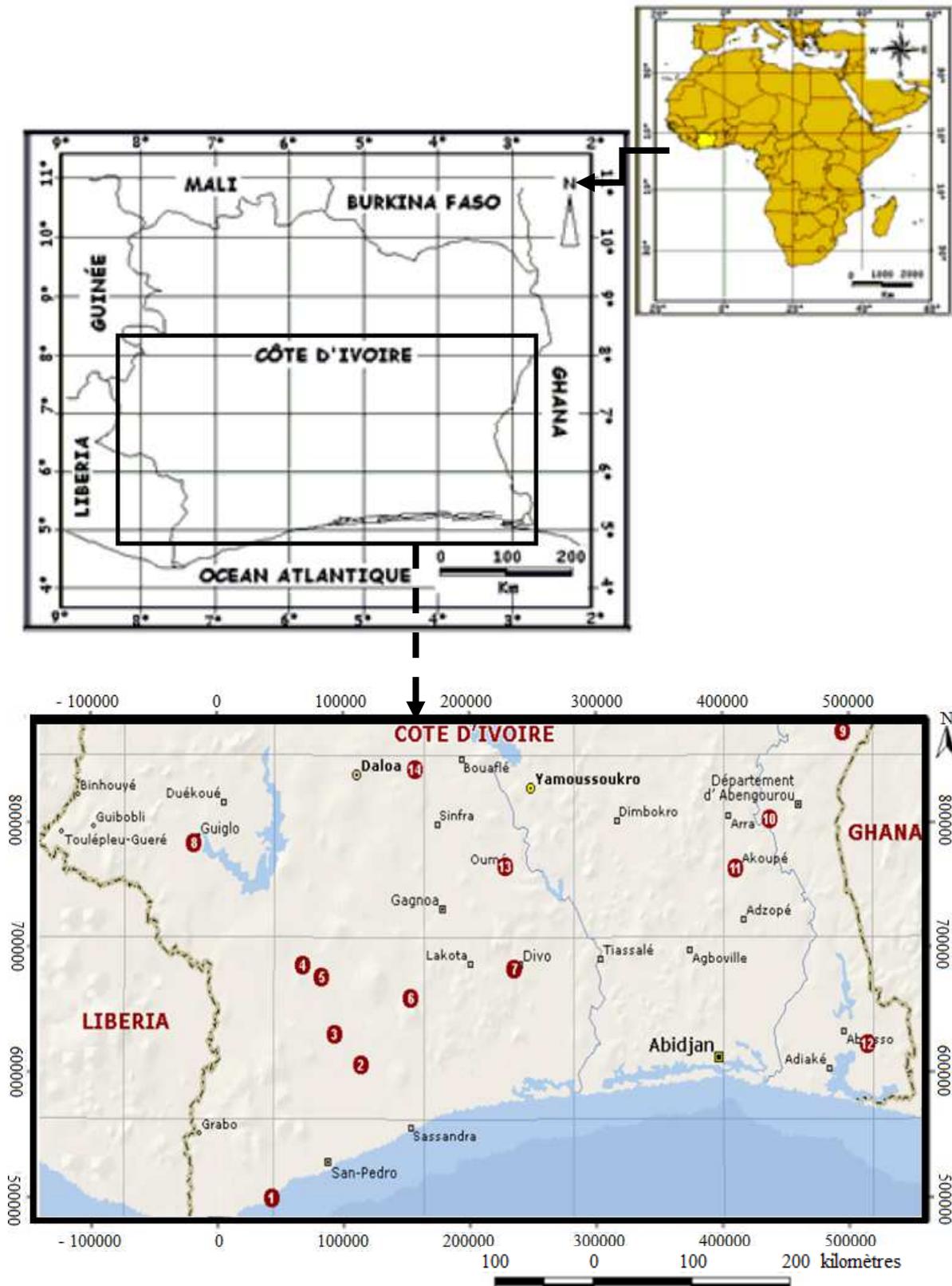


Fig. 1. Localisation des différents sites d'étude

Tableau I. Principales caractéristiques des sites dans les 14 localités sous cacaoyères

N°	Localités	Types de sols (ISSS, ISRIC et FAO, 1998)	Caractères généraux des sols (Gerold, 1996).
1 12	Touih (Sassandra) (Tou) Aboisso (Abo)	Xanthic Ferralsols (Frxa) Xanthic Ferralsols (Frxa)	Sols rouges, gravillonnaires, acides, argileux de type 1:1 et riches en sesquioxydes, forte proportion d'oxydes de fer et d'oxydes d'aluminium
2 3 4 5 7 8 9 10 11	Gnamienkro (Gna) Guéyo (Gué) Sarakagui (Sar) Kragui (Kra) Divo (Div) Guiglo (Gui) Agnibilékro (Agn) Abengourou (Abe) Akoupé (Ako)	Haplic Acrisols (Acha) Ferric Acrisols (Acfr) Haplic Acrisols (Acha) Haplic Acrisols (Acha) Ferric Acrisols (Acfr) Ferric Acrisols (Acfr) Plinthic Acrisols (Acpl) Plinthic Acrisols (Acpl) Haplic Acrisols (Acha)	Sol extrêmement érodé, propriétés chimiques pauvres, peu de nutriments pour les plantes, une teneur élevée en aluminium, une grande sensibilité à l'érosion et une faible capacité d'échange de cations
6	Grand – Béreby (Gra)	Ferralic Arenosols (Arfl)	Sol beige ocre sableux à argilo-sabloneux, à hydromorphie de profondeur
13 14	Oumé (Oum) Bouaflé (Bfl)	Ferralic Cambisols (Cmfl) Ferralic Cambisols (Cmfl)	sol ocre à rouge argilo-sableux à argileux, gravillonnaire dès la surface ou plus en profondeur

Tableau II. Taux de matière organique et de ses différents constituants (Euroconsult, 1989)

Taux de fertilité	MO (mg g ⁻¹)	C (mg g ⁻¹)	N (mg g ⁻¹)	C/N
Très bas	<10	<6	<0,5	<8
Bas	10-20	6-10,25	0,5-1,25	8-10
Moyen	20,1-40,2	10,26-20,5	1,26-2,25	11-15
Élevé	40,3-60	20,51-30,5	2,26-3	16-25
Très élevé	>60	>30,5	>3	>25

4 ANALYSES STATISTIQUES

Les données obtenues ont été soumises à une analyse de variance avec le logiciel XLSTAT (2007), où les comparaisons des moyennes ont été réalisées aux seuils de signification de 0,05 ; 0,001 et 0,0001. Le logiciel Tanagra a également été utilisé pour l'analyse de corrélation (coefficient de corrélation de Pearson) entre les différents paramètres mesurés.

5 RESULTATS

5.1 STATUTS ORGANIQUE ET ACIDO-BASIQUE DES SOLS SOUS CACAORYERES

Le **tableau III** résume les statuts organiques et acido-basiques des 140 cacaoyères échantillonnées. Les deux variables C et N présentent les mêmes évolutions dans toutes les zones. Les teneurs élevées en C et N sont observées à Gnamienkro ($2,59 \pm 0,13 \text{ gkg}^{-1}$ et $0,20 \pm 0,11 \text{ gkg}^{-1}$) et les faibles teneurs à Touih ($1,164 \pm 0,26 \text{ gkg}^{-1}$ et $0,08 \pm 0,02 \text{ gkg}^{-1}$) (**Tableau III**).

Concernant les types de sols, les variables C et N ne diffèrent pas significativement ($P = 0,747$ et $P = 0,485$, respectivement) (**Figure 2**).

Les sols étudiés ont des réactions qui varient de très acides ($\text{pH} < 5,8$), acides ($5,8 < \text{pH} \leq 6$), peu acides ($6 < \text{pH} \leq 6,5$) et neutres ($6,5 < \text{pH} \leq 7$). La localité d'Agnibilékro a fourni la valeur de pH la plus élevée ($6,61 \pm 0,61$), quoique statiquement identique à celles de Abengourou ($6,58 \pm 0,65$), Akoupé ($6,68 \pm 0,44$), Bouaflé ($6,55 \pm 0,47$) et Divo ($6,40 \pm 0,77$). Les valeurs les plus acides ont été observées sur les sites de Touih ($5,16 \pm 0,31$), Sarakagui ($5,44 \pm 0,30$), Aboisso ($5,49 \pm 0,77$), Gnamienkro ($5,52 \pm 0,65$) et Guéyo ($5,52 \pm 0,3$) qui sont statiquement identiques (**Tableau III**).

5.2 STATUT NUTRITIF SELON LES BASES ECHANGEABLES ET LE PHOSPHORE ASSIMILABLE

Le statut nutritif, évalué par la mesure des concentrations en éléments biodisponibles dans les sols : cations (Ca, Mg et K) et phosphore, est consigné dans le **tableau IV**. Au niveau des bases échangeables, les sols étudiés sont appauvres en Ca²⁺ (1,56±0,6 et 8,78±9,4 cmol kg⁻¹) et Mg²⁺ (0,56±0,27 et 2,04±0,75 cmol kg⁻¹) et K⁺ (0,14±0,06 et 0,53±0,52 cmol kg⁻¹).

Tableau III. Statuts organique, acido-basique des sols des 14 sites étudiés

(g kg ⁻¹)					Acidité échangeable	Acidité actuelle
VSM	26	28,8	0,3	12,5	0,8	6,05
Sites	C	MO	N	C/N	Al ³⁺	pH eau
Abe	2,1 ± 0,63 ^{ab}	3,6 ± 1,09	0,18±0,05 ^{ab}	11,17±0,76 ^{cd}	0±0 ^b	6,58±0,65 ^{abc}
Abo	2,31 ± 0,59 ^{ab}	3,97 ± 1,02	0,19±0,05 ^{ab}	12,14±0,80 ^{bc}	0,22±0,25 ^a	5,49±0,77 ^{ef}
Agn	1,523 ± 0,4 ^{ab}	2,61 ± 0,70	0,13±0,04 ^{abc}	11,33±0,73 ^{cd}	0±0 ^b	6,61±0,61 ^{ab}
Akp	1,841 ± 0,3 ^{ab}	3,16 ± 0,61	0,17±0,03 ^{abc}	10,69±0,71 ^d	0±0 ^b	6,68±0,44 ^a
Bfl	1,192 ± 0,47 ^b	2,05 ± 0,80	0,10±0,05 ^{bc}	12,06±1,44 ^{bcd}	0,006±0,02 ^b	6,55±0,47 ^{abc}
Div	1,4035 ± 0,4 ^{ab}	2,41 ± 0,68	0,12±0,03 ^{abc}	11,05±0,91 ^{cd}	0,011±0,02 ^b	6,40±0,77 ^{abcd}
Gna	2,59 ± 0,13 ^a	4,45 ± 2,35	0,20±0,11 ^a	12,90±0,92 ^{ab}	0,19±0,25 ^a	5,52±0,65 ^{ef}
Gra	1,693 ± 0,51 ^{ab}	2,91 ± 0,88	0,14±0,04 ^{abc}	11,84±0,65 ^{bcd}	0±0 ^b	5,95±0,28 ^{cde}
Gué	1,743 ± 0,54 ^{ab}	2,99 ± 0,93	0,13±0,04 ^{abc}	12,79±1,24 ^{ab}	0,02±0,04 ^b	5,52±0,30 ^{ef}
Gui	1,969 ± 0,42 ^{ab}	3,38 ± 0,73	0,17±0,05 ^{abc}	11,52±1,22 ^{bcd}	0±0 ^b	6,09±0,42 ^{bcd}
Kra	1,409 ± 0,5 ^{ab}	2,42 ± 0,87	0,12±0,04 ^{abc}	11,58±0,86 ^{bcd}	0±0 ^b	5,82±0,36 ^{def}
Oum	2,239 ± 1,82 ^{ab}	3,85 ± 3,1	0,16±0,12 ^{abc}	12,83±1,32 ^{ab}	0,03±0,10 ^b	6±0,59 ^{bcd}
Sar	2,125 ± 1,06 ^{ab}	3,65 ± 1,83	0,17±0,07 ^{abc}	12,21±0,85 ^{bc}	0,06±0,09 ^b	5,44±0,30 ^{ef}
Tou	1,164 ± 0,26 ^b	2 ± 0,46	0,08±0,02 ^c	13,69±1,68 ^a	0,14±0,016 ^{ab}	5,16±0,31 ^f
Fcal	3,007 **	3,007**	3,017**	6,370***	4,71***	11,01***
Pcalc	0,000712	0,000712	0,000685	0	0,000001	0
Pth	≤ 0,001	≤ 0,001	≤ 0,001	≤ 0,0001	≤ 0,0001	≤ 0,0001

Les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha < 0,05$, selon la méthode de Student - Newman - Keuls (SNK). * = significative ** = hautement significative et *** = très hautement significative ; V = taux de saturation ; VSM = Valeur seuil moyenne selon Snoeck et al., (2015) ; Fcal = valeur de Fisher calculée ; Pcalc = probabilité calculée ; Pth = probabilité théorique ; Abe : Abengourou ; Abo : Aboisso ; Agn : Agnibilékro ; Akp : Akoupé ; Bfl : Bouafilé ; Gna : Gnamienkro ; Gra : Grand-Béréby ; Gué : Guéyo ; Gui : Guiglo ; Kra : Kragui ; Oum : Oumé ; Sar : Sarakagui ; Tou : Touih.

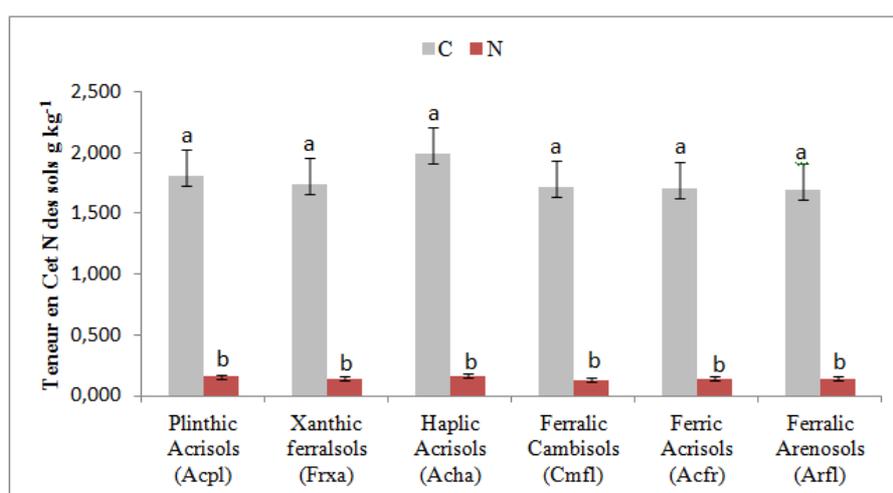


Figure 2. : Distribution des sols en fonction des caractéristiques de la matière organique

C = carbone ; N = azote

Les sols d'Agnibilékro présentent les meilleurs taux en Ca^{2+} ($8,78 \pm 9,4 \text{ cmol kg}^{-1}$) qui sont statiquement identiques aux concentrations des autres sols, à l'exception des sites de Guéyo et de Touih qui ont eu des concentrations plus faibles et statiquement identiques : $2,83 \pm 1,33$ et $1,56 \pm 0,6 \text{ cmol kg}^{-1}$, respectivement. Quant à K^+ et Mg^{2+} , les meilleures concentrations ont été obtenues à Aboisso ($0,53 \pm 0,52$) et Abengourou ($2,04 \pm 0,75$). Ces teneurs sont statiquement identiques à celles des autres sites, excepté Touih, avec K^+ ($0,14 \pm 0,06$) et Mg^{2+} ($0,56 \pm 0,27$) (Tableau IV). Au niveau des types des sols, seul Ca^{2+} présente des concentrations hautement significatives ($F = 4,222$; $\text{Pr} < 0,001$). Le calcium est l'élément le plus dominant et représente 70 à 80 p.c. des cations échangeables dans tous les sols (Figure 3). Les Plinthic Acrisols présentent les concentrations élevées en Ca^{2+} ; ces dernières sont statistiquement identiques à celles des Ferralic Cambisols. Mg^{2+} et K^+ ne présentent aucune différence significative au niveau des types de sols (Figure 3). Les valeurs de la CEC les plus élevées sont obtenues à Abengourou ($10,96 \pm 2,87$) et à Gnamienkro ($11,06 \pm 5,76$). Ces teneurs sont statiquement identiques à celles des autres sites (excepté Touih : $4,70 \pm 1,24 \text{ cmol kg}^{-1}$) (Tableau III). Hormis Touih, le taux de saturation moyen (V) est dans l'ensemble supérieur à 60 % Le phosphore (P_{ass} : $10,15 \pm 3,8 - 63,56 \pm 51,51 \text{ mgkg}^{-1}$) y apparaît comme l'un des excédentaires (Tableau IV).

5.3 STATUT NUTRITIF EVALUE SELON LES CAS DES EQUILIBRES CHIMIQUES

La proportion de K, par rapport à la somme des bases échangeables (K + Ca + Mg) ou SBE > 4 p.c.. Dans tous les sols, l'équilibre bases échangeables-azote (SBE + 6,15/N) est supérieur à 8,9 ; indiquant un équilibre entre les bases échangeables et N.

Tableau IV. Statut nutritif des sols des 14 zones étudiées

VSM	Base échangeables et capacité d'échange cationique (cmol kg^{-1})				(mgkg ⁻¹)	
	11	0,7	2,45	21	11,5	V (%)
Sites	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	CEC	P ₂ O ₅	
Abe	6,75±2,38 ^{ab}	0,46±0,14 ^{ab}	2,04±0,75 ^a	10,96±2,87 ^a	16,13±9,42 ^b	84,6
Abo	3,23±1,75 ^{ab}	0,53±0,52 ^a	1,38±1,17 ^{ab}	9,06±2,69 ^{ab}	15,61±9,43 ^b	53,29
Agn	8,78±9,40 ^a	0,33±0,12 ^{ab}	1,48±0,67 ^{ab}	7,99±2,91 ^{ab}	18,31±22,27 ^b	122,55
Akp	6,21±2,06 ^{ab}	0,48±0,16 ^{ab}	1,71±0,38 ^{ab}	9,06±2,12 ^{ab}	12,86±353 ^b	92,49
Bfl	5,43±4,35 ^{ab}	0,28±0,13 ^{ab}	1,46±1,83 ^{ab}	7,87±6,57 ^{ab}	11,29±9,71 ^b	87,09
Div	5,62±4,56 ^{ab}	0,31±0,08 ^{ab}	1,21±0,48 ^{ab}	7,26±2,67 ^{ab}	16,61±25,66 ^b	89,71
Gna	5,05±3,45 ^{ab}	0,45±0,53 ^{ab}	1,79±1,28 ^{ab}	11,06±5,76 ^a	18,09±23,24 ^b	61,36
Gra	4,13±2,20 ^{ab}	0,27±0,15 ^{ab}	1,45±0,54 ^{ab}	8,11±2,29 ^{ab}	10,50±8,91 ^b	71,21
Gué	2,83±1,33 ^b	0,22±0,09 ^{ab}	1,44±0,73 ^{ab}	6,88±2,58 ^{ab}	16,87±17,20 ^b	63,56
Gui	4,79±2,11 ^{ab}	0,28±0,14 ^{ab}	1,52±0,56 ^{ab}	8,99±2,95 ^{ab}	23,23±31,51 ^b	74,35
Kra	3,29±1,72 ^{ab}	0,18±0,15 ^{ab}	0,95±0,45 ^{ab}	6,34±2,73 ^{ab}	20,66±32,71 ^b	69,63
Oum	5,57±6,11 ^{ab}	0,42±0,27 ^{ab}	1,60±0,99 ^{ab}	10,02±7,56 ^{ab}	63,56±51,51 ^a	73,65
Sar	3,42±1,20 ^{ab}	0,25±0,17 ^{ab}	1,12±0,33 ^{ab}	8,59±4,30 ^{ab}	10,15±3,80 ^b	59,47
Tou	1,56±0,60 ^b	0,14±0,06 ^b	0,56±0,27 ^b	4,70±1,24 ^b	15,91±9,94 ^b	48,34
Fcal	2,33**	2,37**	1,83*	1,9*	3,43***	4,873***
Pcalc	0,007968	0,006938	0,044998	0,034955	0,000147	0,0001
Pth	≤0,001	≤0,001	≤0,05	≤0,05	≤0,0001	≤0,0001

Les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha < 0,05$, selon la méthode de Student - Newman - Keuls (SNK). * = significative ** = hautement significative et *** = très hautement significative ; V = taux de saturation ; VSM = Valeur seuil moyenne selon Snoeck et al., (2015) ; Fcal = valeur de Fisher calculée ; Pcalc = probabilité calculée ; Pth = probabilité théorique ; Abe : Abengourou ; Abo : Aboisso ; Agn : Agnibilékro ; Akp : Akoupé ; Bfl : Bouaflé ; Gna : Gnamienkro ; Gra : Grand-Béreby ; Gué : Guéyo ; Gui : Guiglo ; Kra : Kragui ; Oum : Oumé ; Sar : Sarakagui ; Tou : Touih.

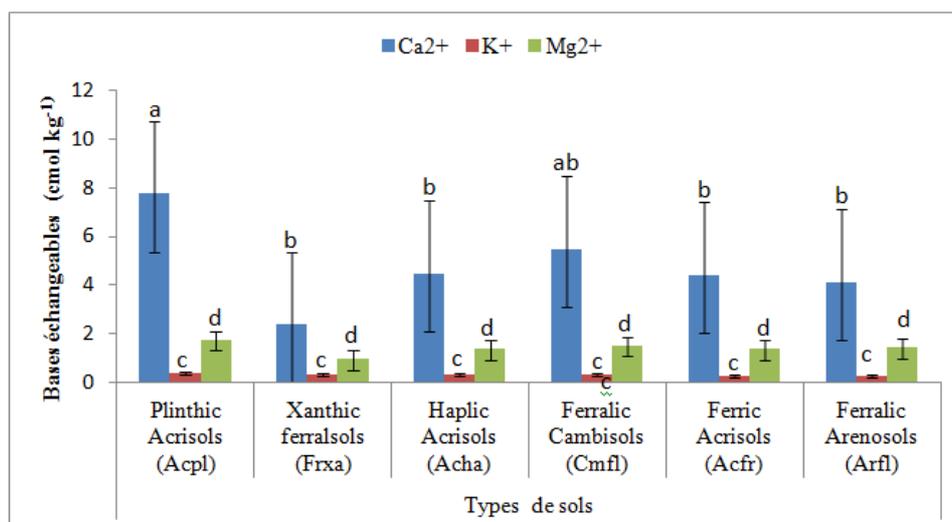


Figure 3. : Distribution des sols en fonction de leur teneur en bases échangeables

Ca²⁺ = ion calcium ; Mg²⁺ = Ion magnésium et K⁺ = ion potassium

Les sols sont excédentaires en P assimilable (**Tableau V**) et N/P₂O₅ total est généralement faible (10,15 ± 3,80 et 63,56 ± 51,51) car inférieur à l'optimum de 1,5 (excepté Divo, Grand-béréby, Sarakagui et Gnamienkro dont N/P₂O₅ >1,5). Le rapport Ca/Mg a varié sans inconvénient entre 2 ± 0,35 et 5,21 ± 2,94. Hormis Guéyo, les moyennes obtenues correspondent à celles requises dans la cacaoculture, qui est de 2,8 (**Tableau V**). Le rapport Mg/K, est de l'ordre de 2,77 ± 1,27 et 6,52±2,62 est dans l'ensemble des cacaoyères prospectées. Les moyennes du rapport Ca + Mg/ K (10,5 ± 1,53 et 28,4 ± 4,8, sont généralement supérieures à la moyenne normale (11,5), sauf celle d'Aboisso (10,5±1,53) (**Tableau V**).

5.4 STATUT NUTRITIF EVALUE SELON LES CAS DES OLIGO-ELEMENTS (Fe, Zn, B, Cu ET Mn)

La richesse en oligo-éléments a été faite grâce à la mesure des teneurs en fer (Fe), zinc (Zn), bore (B), cuivre (Cu), et manganèse (Mn) (**Tableau VI**). Du point de vue des zones, à l'exception de Touih où le taux du Cu < 1,1 mgkg⁻¹, les teneurs moyennes en : Fe (46,67 ± 11,12 à 196,19 ± 95,24 mgkg⁻¹), Zn (1,90 ± 1,14 à 12,62 ± 12,87 mgkg⁻¹), Cu (0,96 ± 0,65 à 4,79 ± 3,48 mgkg⁻¹) et Mn (29,51 ± 45,76 à 168,74 ± 128,88 mgkg⁻¹), sont supérieures aux seuils (27 ; 1,4 ; 1,1 ; 7,5 mgkg⁻¹), respectivement. Le site ayant la plus forte concentration en Fe²⁺ est situé à Gnamienkro, avec 196,19 ± 95,24 mgkg⁻¹. Ces teneurs sont statistiquement identiques à celles d'Aboisso.

Tableau V. Caractéristiques des équilibres chimiques des sols des 14 zones étudiés

VSM	1,5	2,8	3	11,5
Sites	N/P ₂ O ₅	Ca/Mg	Mg/K	Ca +Mg/K
Abe	1,46±0,78 ^{abc}	3,42±0,96 ^{bc}	4,58±1,25 ^{ab}	19,72±1,43 ^{ab}
Abo	1,44±0,50 ^{abc}	2,76±1,06 ^{bc}	2,77±1,27 ^b	10,5±1,53 ^b
Agni	1,25±0,61 ^{abc}	5,21±2,94 ^a	4,40±1,46 ^{ab}	27,2±4,64 ^a
Akp	1,41±0,39 ^{abc}	3,63±0,91 ^{abc}	3,67±0,77 ^{ab}	17,02±1,68 ^{ab}
Bfl	1,05±0,29 ^{abc}	4,50±1,06 ^{ab}	4,66±2,87 ^{ab}	22,62±2,73 ^{ab}
Div	1,88±1,34 ^a	4,18±1,98 ^{ab}	3,88±1,33 ^{ab}	21,6±5,2 ^{ab}
Gna	2,08±1,23 ^a	2,87±1,04 ^{bc}	4,99±2,47 ^{ab}	19,56±3,5 ^{ab}
Gra	1,72±0,60 ^{ab}	2,75±0,53 ^{bc}	6,38±2,86 ^a	23,35±2,9 ^{ab}
Gué	1,36±0,74 ^{abc}	2,00±0,35 ^c	6,52±2,62 ^a	19,68±2,5 ^{ab}
Gui	1,45±0,77 ^{abc}	3,33±1,45 ^{bc}	6,04±2,62 ^a	26,3±4,8 ^{ab}
Kra	1,10±0,62 ^{abc}	3,61±1,15 ^{abc}	6,15±2,77 ^a	28,4±4,8 ^a
Oum	0,60±0,76 ^c	3,10±1,19 ^{bc}	4,26±2,33 ^{ab}	17,53±3,3 ^{ab}
Sar	1,75±0,58 ^a	3,03±0,36 ^{bc}	4,95±1,44 ^{ab}	20,25±2,26 ^{ab}
Tou	0,66±0,28 ^{bc}	3,03±0,36 ^{bc}	3,90±1,33 ^{ab}	15,37±1,77 ^{ab}
Fcal	3,28***	3,87***	2,90**	2,12523*
Pcal	0,000259	0,000029	0,001032	0,016783
Pth	≤0,0001	≤0,0001	≤0,001	≤0,05

Les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha < 0,05$, selon la méthode de Student - Newman - Keuls (SNK). * = significative ** = hautement significative et *** = très hautement significative ; VSM = Valeur seuil moyenne selon Snoeck et al., (2015) ; Fcal = valeur de Fisher calculée ; Pcal = probabilité calculée ; Pth = probabilité théorique ; Abe : Abengourou ; Abo : Aboisso ; Agn : Agnibilékro ; Akp : Akoupé ; Bfl : Bouaflé ; Gna : Gnamienkro ; Gra : Grand-Béreby ; Gué : Guéyo ; Gui : Guiglo ; Kra : Kragui ; Oum : Oumé ; Sar : Sarakagui ; Tou : Touih

Tableau VI. Caractéristiques des oligo-éléments des sols des 14 sites étudiés

VSM	27	1,4	0,53	1.1	7,5	¹ Fertilité
Sites	Fe ²⁺	Zn ²⁺	B ⁺	Cu ²⁺	Mn ²⁺	
Abe	60,88±15,02 ^{de}	4,27±2,86b	0,51±0,13 ^a	3,01±0,88ab	110,76±45,29abcd	Moyen
Abo	179,96±60,33 ^{ab}	4,72±3,93b	0,32±0,13 ^a	2,20±1,49ab	54,02±43,87cd	Moyen
Agni	52,44±20,59 ^{de}	4,05±3,51b	0,40±0,15 ^a	3,08±1,76ab	77,9±46,13bcd	Moyen
Akp	66,68±13,84 ^{de}	7,64±7,31ab	0,47±0,06 ^a	2,45±0,89ab	110,85±34,31abcd	Moyen
Bfl	46,67±11,12 ^e	1,50±0,80b	0,28±0,08 ^a	2,26±0,87ab	135,6±51,84abc	Bas
Div	53,29±15,27 ^{de}	2,99±1,95b	0,32±0,12 ^a	3,23±2,55ab	150,60±107,60ab	Moyen
Gna	196,19±95,24 ^a	5,79±6,02ab	0,42±0,19 ^a	3,08±2,26ab	41,19±43,66d	Élevé
Gra	72,65±14,69 ^{de}	4,54±3,54b	0,36±0,12 ^a	3,03±1,31ab	81,85±63,91bcd	Moyen
Gué	105,52±41,35 ^{cd}	4,68±3,21b	0,42±0,11 ^a	1,47±0,58b	31,87±13,08d	Moyen
Gui	75,64±16,53 ^{de}	4,22±2,80b	0,31±0,22 ^a	4,79±3,48a	168,74±128,88a	Moyen
Kra	71,09±15,03 ^{de}	7,18±12,06ab	0,34±0,41 ^a	3,38±3,60ab	119,28±73,47abcd	Moyen
Oum	91,76±66,30 ^{de}	12,62±12,87a	0,50±0,16 ^a	2,98±2,20ab	66,69±34,49bcd	Moyen
Sar	145,89±63,69 ^{bc}	3,33±2,82b	0,37±0,09 ^a	1,87±0,85b	38,46±23,42d	Moyen
Tou	112,69±30,37 ^{cd}	1,90±1,14b	0,29±0,09 ^a	0,96±0,65b	29,51±45,76d	Bas
Fcal	12,47**	2,26*	1,93*	2,43**	5,55***	
Pcal	0	0,010252	0,032111	0,0057	0	
Pth	≤0,01	≤0,01	≤0,01	≤0,01	≤0,0001	

Les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha < 0,05$, selon la méthode de Student - Newman - Keuls (SNK). * = significative ** = hautement significative et *** = très hautement significative ; VSM = Valeur seuil moyenne selon Snoeck et al., (2015) ; Fcal = valeur de Fisher calculée ; Pcal = probabilité calculée ; Pth = probabilité théorique ; Abe : Abengourou ; Abo : Aboisso ; Agn : Agnibilékro ; Akp : Akoupé ; Bfl : Bouaflé ; Gna : Gnamienkro ; Gra : Grand-Béreby ; Gué : Guéyo ; Gui : Guiglo ; Kra : Kragui ; Oum : Oumé ; Sar : Sarakagui ; Tou : Touih

Les taux en Fe les plus faibles sont observés à Bouaflé ($46,67 \pm 11,12 \text{ mgkg}^{-1}$). Ils sont statistiquement identiques à ceux d'Abengourou ($60,88 \pm 15,02 \text{ mgkg}^{-1}$), Agnibilékro ($52,44 \pm 20,59 \text{ mgkg}^{-1}$), Akoupé ($66,68 \pm 13,84 \text{ mgkg}^{-1}$), Divo ($53,29 \pm 15,27 \text{ mgkg}^{-1}$), Grand-Bereby ($72,65 \pm 14,69 \text{ mgkg}^{-1}$), Guiglo ($75,64 \pm 16,53 \text{ mgkg}^{-1}$), Kragui ($71,09 \pm 15,03 \text{ mgkg}^{-1}$) et Oumé ($91,76 \pm 66,30 \text{ mgkg}^{-1}$). Les teneurs en Zn^{2+} sont plus fortes à Oumé ($12,62 \pm 12,87 \text{ mgkg}^{-1}$). Ces taux sont statistiquement identiques à ceux d'Akoupé, Gnamienkro et Kragui. Les 10 sites restants ont fourni des valeurs plus faibles (de $1,90 \pm 1,14$ à $4,27 \pm 2,86 \text{ mgkg}^{-1}$). Quant aux Cu^{2+} et Mn^{2+} , les deux variables ont eu leurs concentrations les plus élevées à Guiglo, avec respectivement $4,79 \pm 3,48$ et $168,74 \pm 128,88 \text{ mgkg}^{-1}$. Les concentrations les plus faibles en Cu^{2+} sont observées à Touih, Guéyo et Sarakagui dont les teneurs sont statistiquement identiques. Le B^+ y est déficient, avec des concentrations ($0,29 \pm 0,09$ à $0,51 \pm 0,13 \text{ mgkg}^{-1}$) statistiquement identiques sur tous les sites. Tous ces résultats aboutissent à des potentiels de fertilité bas (Bouaflé et Touih), élevé (Gnamienkro), en passant par moyen pour les autres sites restants (**Tableau VI**).

Au niveau de types de sols, les teneurs en Cu^{2+} ($F = 1,68$; $\text{Pr} > F = 0,143$), Zn^{2+} ($F = 1,2$; $\text{Pr} > F = 0,313$) et B^+ ($F = 1,681$; $\text{Pr} > F = 0,143$) n'ont pas présenté de différences significatives. Mais en revanche, des différences très hautement significatives existent entre les teneurs en Fe^{2+} des six types de sols ($F = 9,07$; $\text{Pr} < 0,0001$). Les valeurs les plus fortes sont les Xanthic Ferralsols et les Haplic Acrisols, avec des moyennes statistiquement identiques de $146,325$ et $119,96 \text{ mgkg}^{-1}$, respectivement. Les quatre types restants, avec des taux en Fe^{2+} statistiquement identiques, varient entre $56,66 \text{ mgkg}^{-1}$ (Plinthic Acrisols) et $78,15 \text{ mgkg}^{-1}$ (Ferric Acrisols) (**Tableau VI**).

La teneur en Mn^{2+} ($F = 3,02$; $\text{Pr} < 0,05$) est significativement plus élevée sur les Ferric Acrisols, avec $117,073$; ce qui est statistiquement identique à celles des Ferralic Cambisols ($101,145$), des Plinthic Acrisols ($94,33$), des Ferralic Arenosols ($85,31$) et des Haplic Acrisols ($77,445 \text{ mgkg}^{-1}$). Les Xanthic Ferralsols présentent les plus faibles concentrations, avec $41,765 \text{ mgkg}^{-1}$ (**Figure 4**). Les sols peu favorables représentent 93 p.c. de la couverture pédologique étudiée; il s'agit des sols observés dans tous les périmètres d'étude. Les sols favorables, présents à Gnamienkro, ont un niveau de fertilité chimique relativement élevé (**Tableau VI**). Cependant, ces sols renferment de fortes concentrations de fer facilement disponible ($\text{Fe} > 27 \text{ mgkg}^{-1}$).

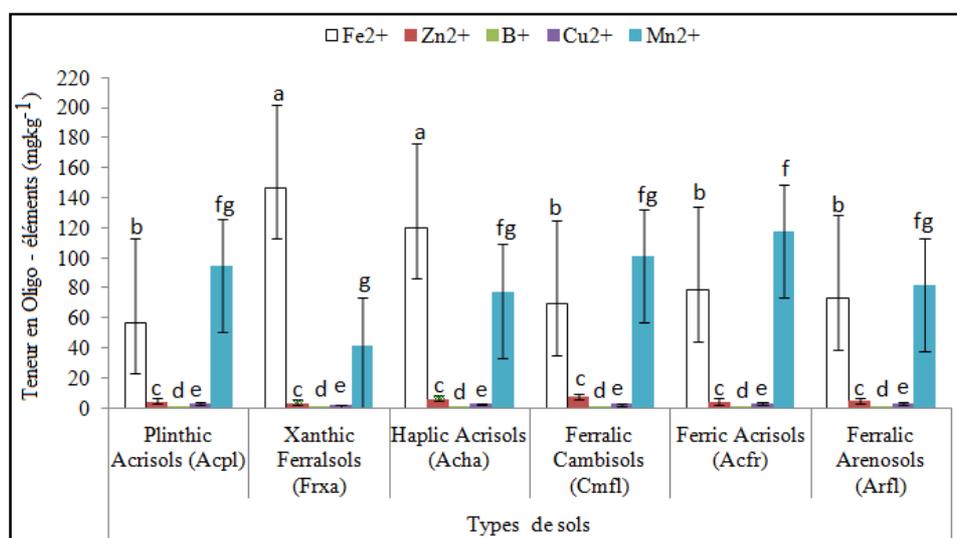


Figure 4. : Distribution des sols en fonction de leur teneur en oligo - éléments

Fe^{2+} = ion fer ; Zn^{2+} = ion zinc ; B^+ = ion bore ; Cu^{2+} = ion cuivre et Mn^{2+} = ion manganèse.

5.5 CORRELATIONS DE PEARSON ENTRE LES ELEMENTS CHIMIQUES DES SOLS DES 14 SITES

Les coefficients de corrélation (r^2) obtenus à partir des régressions linéaires réalisées sont une expression des proportions dans lesquelles les variables dépendantes sont expliquées par les modèles. Ainsi, la série de corrélations, entre, d'une part, les matières organiques (MO) et les autres variables du sol, et, d'autre part, entre les pH et le phosphore assimilable (P_2O_5) de ces mêmes variables, a mis en exergue l'influence des matières organiques, du pH et du phosphore assimilable sur la qualité des sols étudiés. Les corrélations de Pearson sont rapportées dans le **Tableau VII**. La comparaison entre les teneurs moyennes montre une diminution dans une même proportion du carbone et de l'azote et, en conséquence, une stabilité du

rapport C/N (**Tableau III**). Parallèlement, la diminution de la CEC est nettement corrélée à celle du taux de matière organique ($r > 0,80$). Ainsi la contribution de la matière organique à la CEC totale a diminué, ce qui explique en grande partie la hausse significative du taux de saturation (**Tableau IV**). La CEC de ces sols est directement subordonnée à l'influence stimulatrice de MO : la contribution des MO à l'augmentation de la CEC est estimée à plus de 70 p.c. ($r^2 = 0,70$). Quant à celle du P_2O_5 , la hausse des oligo – éléments a été de 66,7 p.c. ($R^2 = 0,667$). Les résultats obtenus montrent que la CEC de tous les sols étudiés sont corrélées positivement avec la teneur en matière organique. Le pH des sols étudiés est acide à légèrement acide. Les résultats rapportés ici permettent de mettre en évidence l'existence des corrélations entre ce facteur Ca. En outre ce facteur est positivement corrélé avec tous les oligo-éléments des différents sols. D'autre part, les analyses de corrélation linéaire de Pearson n'ont pas montré de contribution significative du pH sur la CEC (excepté Akoupé et Agnibilékro).

Tableau VII. Corrélations entre matière organique, pH_{eau} et quelques variables chimiques des sols échantillonnés

	Couples	r	r ²	t	Pr(> t)		Couples	r	r ²	t	Pr(> t)
Abe	MO-CEC	0,91	0,83	6,27	0,0002	Gna	MO-CEC	0,95	0,9	8,38	0
	pH-Ca	0,69	0,48	2,72	0,0265		pH-Mg	0,78	0,6	3,49	0,0082
Abo	MO-CEC	0,87	0,76	5,08	0,001	Gra	pH-V	0,76	0,57	3,28	0,0112
	pH-Ca	0,92	0,84	6,46	0,0002		pH-K	0,73	0,54	3,06	0,0157
	pH-Fe	-0,91	0,82	-6,08	0,0003		pH-Ca	0,72	0,52	2,96	0,0182
	pH-Mn	0,8	0,64	3,75	0,0056		Gui	MO-CEC	0,96	0,93	10,39
MO-CEC	0,99	0,97	17,61	0	pH-Ca	0,83		0,69	4,25	0,0028	
Agn	pH-K	0,84	0,71	4,46	0,0021	Kra	MO-CEC	0,98	0,96	13,61	0
	pH-Ca	0,83	0,68	4,16	0,0032		pH-Ca	0,86	0,74	4,78	0,0014
	pH-Mg	0,78	0,6	3,48	0,0083	pH-Fe	-0,7	0,5	-2,8	0,0231	
	pH-N	0,7	0,49	2,75	0,025	Tou	MO-CEC	0,96	0,92	9,6	0
	pH-C	0,67	0,45	2,54	0,0346		pH-Mn	0,91	0,83	6,31	0,0002
	MO-CEC	0,84	0,71	4,41	0,0022		pH-Cu	0,77	0,6	3,44	0,0088
pH-Ca	0,78	0,61	3,52	0,0078	pH-Ca		0,73	0,53	3	0,017	
Bfl	MO-CEC	0,98	0,96	14,35	0	pH-Zn	0,73	0,53	2,99	0,0174	
Div	MO-CEC	0,95	0,91	8,79	0	Gué	pH-Fe	-0,73	0,53	-2,98	0,0176
	pH-Ca	0,89	0,79	5,55	0,0005		MO-CEC	0,91	0,83	6,36	0,0002
	pH-N	0,87	0,77	5,1	0,0009	pH-Ca	0,66	0,44	2,51	0,0366	
	pH-Mg	0,87	0,76	5	0,0011	Sar	MO-CEC	0,97	0,95	12,3	0
	pH-Cu	0,81	0,66	3,98	0,0041		pH-Al	-0,79	0,63	-3,69	0,0061
	pH-C	0,81	0,66	3,92	0,0044	pH-Fe	-0,72	0,52	-2,93	0,0191	
	pH-Zn	0,79	0,63	3,7	0,006	Gna	MO-CEC	0,99	0,98	18,52	0
	pH-Fe	-0,74	0,55	-3,13	0,0141		pH-Al	-0,79	0,62	-3,6	0,007
	pH-Al	-0,64	0,41	-2,36	0,0463		pH-Fe	-0,66	0,44	-2,5	0,0369
	MO-CEC	0,9803	0,9609	14,0273	0		pH-Ca	0,66	0,43	2,48	0,0381
Oum	pH-K	0,6946	0,4824	2,7308	0,0258	pH-Mn	0,63	0,4	2,32	0,0492	

Abe : Abengourou ; Abo : Aboisso ; Agn : Agnibilékro ; Akp : Akoupé ; Bfl : Bouaflé ; Gna : Gnamienkro ; Gra : Grand-Béreby ; Gué : Guéyo ; Gui : Guiglo ; Kra : Kragui ; Oum : Oumé ; Sar : Sarakagui ; Tou : Touih.

6 DISCUSSION

La matière organique participe à l'amélioration de la fertilité des sols; c'est pourquoi, la corrélation entre la CEC et la matière organique est apparue très hautement significative pour des raisons qui seraient liées à une forte intensité de l'activité microbienne dans le sol ou à l'argilisation de la partie supérieure du profil pédologique, qui fixerait également une bonne partie des matières organiques disponibles. Par ailleurs, la corrélation positive hautement significative entre les matières organiques et l'azote ($p < 0,0001$), sont relatives à des informations d'ordre général concernant le sol. La CEC, qui représente la capacité d'échange cationique des sols est faible. Des différences hautement significatives ont été obtenues entre les sites prospectés. Elles sont probablement dues à la variation de la vitesse de minéralisation des matières organiques dans les sols [14], combinée aux effets des pratiques agricoles (surexploitation des sols, amendements organiques ou chimiques insuffisants). Au total, le niveau global légèrement faible de la CEC des sols étudiés, n'est pas sans conséquence

sur la nutrition minérale du cacaoyer, qui pourrait connaître des problèmes de toxicité, plus précisément, la toxicité ferreuse. Vu donc leurs teneurs très élevées en fer échangeable, à partir desquelles de grandes quantités de Fe^{2+} pourraient être mobilisées, les sols étudiés présentent des risques réels de toxicité ferreuse.

Par ailleurs, Fe est moins corrélé à la CEC et Fe^{2+} à 6% ($p < 0,01$), traduit la prédominance du fer sur les divers autres cations du complexe adsorbant. Dans ce cas, les teneurs en fer des sols échantillonnés pourraient jouer un rôle nutritionnel prépondérant ; ce qui entrainerait la perturbation de la nutrition minérale des cacaoyers. La toxicité ferreuse serait une des sols étudiés. Les teneurs moyennes en N et C obtenues sont généralement supérieures à celles obtenues sous les cacaoyères ivoiriennes non dégradées par [5]. Ces comparaisons incitent à la prudence dans l'affirmation de la dégradation des sols échantillonnés, à l'exception de Touih.

Le pH du sol détermine le type d'activité (acide ou basique) existante ou prédominante. Ce fait fut démontré par [15]; [16], pour la sensibilité des cacaoyers à l'acidité. Selon l'échelle d'interprétation du pH-eau [17], les sols étudiés ont, dans leurs couches 0 – 20 cm, des réactions très acides ($pH < 5,8$), acides ($5,8 < pH \leq 6$), peu acides ($6 < pH \leq 6,5$) et neutres ($6,5 < pH \leq 7$). Des valeurs moins élevées du pH (pH acides), fréquemment corrélatives de facilités d'assimilabilité par les cacaoyers de certains éléments qui leur sont indispensables (phosphore, zinc, manganèse, cuivre et fer) [18] ; [19] ont été rencontrées partout. Il en est de même pour les pH très acides qui sont, très souvent, responsables des carences en oligo-éléments à Touih [20]. [21] a indiqué un optimum pour la cacaoculture variant entre pH 6 – 7,5. Les résultats exposés montrent une forte capacité à neutraliser les acides issus des apports atmosphériques ou générés par le cycle de l'azote, mise en exergue par l'existence de corrélations significatives et positives du couple pH-Ca, rejoignant en cela [22]. Le pH particulièrement faible nécessite un chaulage ([23]; [16]). Conformément aux normes existantes [11], les taux de matières organiques des sols sont globalement faibles. Le niveau de décomposition des matières organiques, donné par le rapport C/N, est, quant à lui, favorable dans l'ensemble des sols prospectés [5] ; [24] : l'hypothèse émise plus haut, selon laquelle, la corrélation significative entre la CEC et les matières organiques proviendrait d'une forte activité microbienne est donc à accepter. Les taux de phosphore assimilable sont forts ou très forts, dans la quasi-totalité des sols prospectés. La situation des teneurs de potassium échangeable, par comparaison aux normes adoptées [11], est différente de celle du phosphore assimilable.

Hormis Oumé, Divo et Kragui, le zinc est corrélé à la matière organique ; ces résultats montrent que le principal mode de rétention de cet élément dans les 11 autres sols, se fait par des échanges ioniques, rejoignant ainsi les travaux de [25].

L'augmentation du cuivre serait due au pH qui a dissout la matière organique [26]. Le rapport Ca/Mg, compris entre 1,5 et 5 est satisfaisant pour la cacaoculture. Ces résultats corroborent ceux de [27] qui a indiqué que les valeurs ci – dessus sont favorables à la plupart des cultures tropicales. La somme des bases échangeables (K^+ , Ca^+ , $Mg^{2+} + 6,15/N$) est supérieur à 8,9, indiquant un équilibre entre les bases échangeables et N. Cela est conforme à la diminution des niveaux des bases échangeables. Le taux de saturation (V) des sols est supérieur à 50 p.c. Selon [28] ont rapporté que les sols avec $V > 50\%$ sont des sols fertiles. Sur cette base, les sols des stations qui abritent les cacaoyers seraient fertiles. En outre, le rapport N/P_2O_5 est généralement inférieur à l'optimum ($N/P_2O_5 = 1,5$). Ces résultats indiquent qu'une fertilisation minérale, en relation avec les systèmes de production doit être adoptée.

7 CONCLUSION

Les analyses chimiques des sols sous cacaoyers de Côte d'Ivoire ont mis en évidence des statuts acido-basique, organique et nutritifs caractéristiques à chaque localité et chaque sol. De façon générale, les sols appauvris en éléments chimiques et en matière organique (moins de 3 p.c.). Les statuts acido-basique sont peu favorables pour la cacaoculture. Par rapport aux besoins des cacaoyers, le taux de saturation du complexe adsorbant, est un bon indicateur pédologique et agronomique des sols échantillonnés. En effet, hormis Touih qui a présenté un sol oligo-saturé, les autres ont présenté des seuils variant de méso-saturé à saturé. Ainsi, seuls 14 p.c. des sols des cacaoyères prospectées avaient un potentiel de fertilité bas et 79 p.c., un potentiel de fertilité moyen pour la cacaoculture et 7 p.c. de ces sols ont eu un potentiel de fertilité élevé pour la cacaoculture. Les sols sont caractérisés par un équilibre cationique (K, Ca et Mg) et N. Ce travail a montré que pour chaque localité et chaque sol, les interprétations des résultats font appel à nos jugements et expériences. C'est pourquoi, le choix des fertilisants devra tenir compte des analyses des cacaoyers, diagnostic foliaire, qui sont des compléments indispensables pour parvenir à un résultat précis.

REFERENCES

- [1] BCEAO, Étude monographique sur la filière cacao dans l'UEMOA Direction Générale de l'Economie et de la Monnaie Direction des Etudes et de la Recherche, 30 p, 2014.

- [2] Assiri AA, Yoro GR, Deheuvelds O, Kébé Bi, Keli ZJ, Adiko A, Assa A. Les caractéristiques agronomiques des vergers de cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences*. 2 (1): 55- 66, 2009.
- [3] Chaussod R., La qualité biologique des sols : Evaluation et implications. *Etude et Gestion des sols*, 3(4) : 261-278,1996.
- [4] Koko L. K., G. Yoro, K. NGoran, A. A. Assiri et A. Assa. Identification des caractères morpho-pédologiques liés à la dégradation précoce des cacaoyers dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. In : 15e Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère, San José, Costa-Rica. 10 p, 2006.
- [5] Koko, K. L., Yoro R. G., N'Goran K. & Assa A. Évaluation de la fertilité des sols sous cacaoyers dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine* 20 (1) : 81 – 95, 2008.
- [6] Troeh F. R. and Thompson LM, *Soils and soil fertility*. 6th ed. Oxford, UK: Blackwell Publishing. 156 p. Walkley A. et Black IA, 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.*, 37 : 29-38, 2005.
- [7] Brou YT : Climat, mutations socio- économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches. Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 212 p, 2005.
- [9] FAO : Évaluation des ressources forestières mondiales 2000 (FRA 2000). Rapport principal, FAO Forestry paper 140. <http://www.fao.org/forestry/fra2000report/fr/>, consulté en 2015, 2000.
- [10] Mathieu C. & Pieltain F., *Analyse chimique des sols. Méthodes choisies*. Édition Technique et Documentation, Paris. 41 p, 2003.
- [11] Snoeck D., Koko L., Joffre J., Bastide P., Jagoret P. Cacao Nutrition and Fertilisation. In: *Sustainable Agriculture Reviews*, Vol. 19, Chapter 4. E. Lichtfouse (Ed.). Cham, Springer International Publishing: 155-202, 2016
- [12] FAO : Méthodes d'analyse physique et chimique des sols et des eaux, *Bulletin pédologique de FAO N° 10 Rome*, 280 p, 1984.
- [13] Euroconsult: *Agricultural compendium for rural development in the tropics and subtropics*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. 740 p, 1989.
- [14] Ciesielski H., Sterckeman T., Baliteau J.-Y., Caria G., Goutiers V. & Willery J.-P. : Évolution du pH et de la CEC des sols du Nord de la France en fonction des doses de chaulage: influence du carbone organique. *Étude et Gestion des Sols*, 15 (3) : 161-170, 2008.
- [15] V. C. Baligar,¹ N. K. Fageria,² A. Q. Paiva,³ A. Silveira,³ A. W. V. Pomella,⁴ and R. C. R. Machado. Light Intensity Effects on Growth and Micronutrient Uptake by Tropical Legume Cover Crops, *Journal of Plant Nutrition*, 29: 1959–1974, 2006.
- [16] Shamshuddin, J., Muhrizal, S., Fauziah, I. & Husni, M. :Effects of adding organic materials to an acid sulfate soil on the growth of cocoa (*Theobroma cacao* L.) seedlings. *Science of the total environment*, 323: 33-45, 2004.
- [17] Lano : *Analyses des terres*. <http://www.lano.asso.fr/web/analyses.html> [Consulté en 2015], , 2008,
- [18] Bensaadi A.,. Contribution à l'étude de l'état nutritionnel des vergers de pommier dans la région d'Ychemoul, Thèse ing, Agro, Univ. Batna, 188 p, 2004.
- [19] El Zahaby, M. :Contribution à la définition d'une norme des sites pollués. Elaboration d'une méthodologie pour l'évaluation de la contamination d'un sol par éléments traces. Thèse Institut National Polytechnique de Lorraine, 210 p, 1998.
- [20] FAO : *Les engrais et leurs applications. Précis à l'usage des agents de vulgarisation agricole*. 4^e édition, Éd. FAO, IFA (Paris, France) et IMPHOS (Casablanca, Maroc), 84 p, 2003.
- [21] Wood G.A.R. *Environment*. In *Cocoa*, Eds G.A.R. Wood and R.A. Lass. Oxford, UK: Blackwell Science pp. 38–79 ,1985
- [22] Lefèvre Y. Essai de mise en évidence d'une évolution récente du pH et de la teneur en cations " basiques " de quelques sols forestiers des Vosges (nord-est de la France). *Annales des sciences forestières*. 54 (5) : 483-492, 1997.
- [23] Delhaize E. et Ryan P.R. Aluminum Toxicity and Tolerance in Plants. *Plant physiol.*107(2) 315-321, 1995
- [24] Genot V., Colinet G.), Brahy V., Bock (L.):L'État de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne (adapté du chapitre4— sol 1 de « L'État de l'Environnement wallon 2006-2007 »). — *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, vol. 13 (1) 121-138, 2009.
- [25] Hatira A., Gallali T., Rouiller J., Guillet B. :Stabilité et solubilité des complexes formés entre le cuivre, le plomb, le zinc et les acides fulviques. *Science du Sol.*, 28 : 125-135, 1990.
- [26] Koko LK, Kassin KE, Assiri AA, Yoro G, N'goran K, Snoeck D Fertilisation minérale du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire: Acquis vulgarisables et perspectives de recherche. *Agronomie Africaine* 23 (3): 217-225, 2011.
- [27] Boyer.J. :Le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales humides et sub-humides. *Cahier ORSTOM*, paris. 173 p, 1982.
- [28] Sharu, M.B., Yakubu, M., Noma S.S. et Tsafe A.I.: Characterization and Classification of Soils on an Agricultural landscape in Dingyadi District, Sokoto State, Nigeria. *Nigeria Journal of Basic and Applied Science*, 21(2): 137-147, 2013.