

République de Côte d'Ivoire

Union-Discipline-Travail



Université Nangui Abrogoua

UFR – SGE

Sciences et Gestion de l'Environnement

ANNEE : 2012-2013

N° du candidat : 02-01-017576

Nom : **NANGAH**

Prénoms : **Krogba Yves**

Laboratoire : Géosciences et Environnement

Membres du Jury :

M. GOURENE Germain (Président)

Professeur Titulaire UNA

M. SAVANE Issiaka (Co-directeur)

Directeur de Recherches UNA

M. YAO-KOUAME Albert (Co-directeur)

Professeur Titulaire UFHB

M. KOUAME Koffi Fernand (Rapporteur)

Maître de Conférences UFHB

M. CAMARA Mameri (Rapporteur)

Directeur de Recherches CNRA

M. ANGUI Kouassi Tehua Pascal (Examineur)

Maître de Conférences UNA

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

N° d'ordre : 183

THESE UNIQUE

Pour l'obtention du

**Diplôme de Doctorat de l'Université
Nangui Abrogoua**

**en SCIENCES ET GESTION DE
L'ENVIRONNEMENT**

OPTION : Géosciences et Environnement

Spécialité : Pédologie

THEME :

**Caractérisation pédologique et
distribution des éléments traces
métalliques dans les sols
manganésifères dérivés de
matériaux volcano-
sédimentaires en Côte d'Ivoire**

Date de soutenance : Vendredi 07 mars 2014

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	vii
REMERCIEMENTS	viii
LISTE DES ABREVIATIONS.....	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
RESUME	xxiv
ABSTRACT.....	xxiv
INTRODUCTION	i
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	
CHAPITRE I : CADRE DE L'ETUDE	5
1-1 Situation géographique des sites étudiés.....	5
1-2 Climat	7
1-2-1 Climat de Dassoumblé (Korhogo).....	7
1-2-2 Climat de Kanguélé (Bondoukou).....	8
1-2-3 Climat de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro).....	8
1-2-4 Climat de Lauzoua (Guitry)	9
1-3 Végétation des zones étudiées.....	11
1-3-1 Végétation de Dassoumblé (Korhogo).....	11
1-3-2 Végétation de Kanguélé (Bondoukou).....	11
1-3-3 Végétation de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro).....	12
1-3-4 Végétation de Lauzoua (Guitry).....	13
1-4 Relief et hydrographique des zones étudiées	13
1-4-1 Relief et hydrographique de Dassoumblé (Korhogo)	14

1-4-2 Relief et hydrographique de Kanguélé (Bondoukou)	14
1-4-3 Relief et hydrographique de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro)	15
1-4-4 Relief et hydrographique de Lauzoua (Guitry)	16
1-5 Contexte géologique.....	16
1-6 Sols	19
1-6-1 Cambisols	19
1-6-2 Sols manganésifères	20
1-6-3 Sols des zones étudiées	22
1-7 Activités agricoles	25
CHAPITRE II : ELEMENTS TRACES METALLIQUES (ETM).....	26
2-1 Définition et concept clé	26
2-2 Origine des éléments traces métalliques	26
2-2-1 Sources naturelles.....	26
2-2-2 Sources anthropiques.....	29
2-3 Facteurs de la mobilité des éléments traces métalliques.....	31
2-3-1 Acidité	31
2-3-2 Etat d'oxydo-réduction.....	31
2-3-3 Oxydes et hydroxydes	32
2-3-4 Matière organique et complexe argilo-humique	33
2-3-5 Carbonates	33
2-3-6 Solution du sol.....	34
2-4 Eléments traces métalliques étudiés.....	34
2-4-1 Chrome	34
2-4-2 Nickel	35
2-4-3 Cobalt	35

2-4-4 Cuivre	36
2-4-5 Plomb.....	36
2-4-6 Zinc.....	36
2-4-7 Cadmium	37
2-4-8 Manganèse.....	37
2-4-9 Fer.....	38

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE III : MATERIEL	39
3-1 Matériel de prospection.....	39
3-2 Matériel de laboratoire	39
3-2-1 Granulométrie.....	39
3-2-2 pH.....	40
3-2-3 Carbone organique et azote total.....	40
3-2-4 Phosphore total et assimilable	41
3-2-5 Capacité d'échange cationique (CEC) et bases échangeables	41
3-2-6 Eléments traces métalliques	41
3-3 Données de télédétection.....	42
3-4 Matériel de traitement numérique	42
CHAPITRE IV : METHODES	43
4-1 Choix des sites d'étude.....	43
4-2 Prospection pédologique et échantillonnage du sol	43
4-3 Codification des horizons.....	44
4-4 Préparation des échantillons pour analyse	45
4-5 Caractérisation physique et chimique des sols.....	45
4-5-1 Teneur en éléments grossiers	46

4-5-2 Détermination des fractions fines du sol.....	46
4-5-3 pH du sol	47
4-5-4 Carbone et matières organiques	47
4-5-5 Azote totale.....	47
4-5-6 Phosphore du sol	48
4-5-7 Capacité d'échange cationique et cations échangeables.....	48
4-5-8 Détermination des éléments traces métalliques	49
4-6 Facteurs d'enrichissement en ETM.....	49
4-7 Analyses statistiques	50
4-8 Cartographie des sols	51
4-8-1 Amélioration du contraste	51
4-8-2 Calcul d'indices spectraux	51
4-8-3 Classification des images	53

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE V : RESULTATS.....	55
5-1 Caractéristiques morphologiques des sols	55
5-1-1 Evolution des caractères physiques du sol à l'échelle du versant	55
5-1-1-1 Couleur.....	55
5-1-1-2 Structure du sol	56
5-1-1-3 Eléments grossiers.....	58
5-1-1-4 Effet de la topographie sur la répartition des particules granulométriques.....	58
5-1-2 Caractères morphologiques des sols des différents sites.....	62
5-1-2-1 Couleur du sol	62
5-1-2-2 Structure du sol	62

5-1-2-3	Eléments grossiers.....	63
5-1-2-4	Granulométrie des sites d'étude.....	64
5-2	Caractéristiques chimiques des sols.....	65
5-2-1	Caractéristiques des sols manganésifères le long de la toposéquence.....	65
5-2-1-1	pH du sol en fonction de la topographie.....	65
5-2-1-2	Distribution de la matière organique et du phosphore suivant le gradient topographique des sols riches en manganèse.....	66
5-2-1-3	Evolution du complexe adsorbant selon la profondeur et le segment topographique.....	69
5-2-2	Caractéristiques des sols dans les sites d'étude.....	71
5-2-2-1	pH du sol selon le site d'étude.....	71
5-2-2-2	Minéralisation de la matière organique selon les sites d'étude.....	71
5-2-2-3	Teneurs en phosphore total et en phosphore assimilable.....	72
5-2-2-4	Distribution des teneurs en cations alcalinoterreux et en cations alcalins sur les sites étudiés.....	73
5-2-2-5	Capacité d'échange cationique, taux de saturation en bases et somme des bases.....	74
5-2-3	Relations entre les paramètres physico-chimiques des sols.....	76
5-2-4	Facteurs et processus majeurs de distribution des sols.....	82
5-3	Distribution des ETM dans les sols.....	85
5-3-1	Teneur totale en ETM.....	85
5-3-2	Répartition des ETM à l'échelle du versant.....	86
5-3-2-1	Evolution des ETM dans la couche 0-60 cm en fonction des niveaux topographiques.....	91

5-3-3 Evolution des teneurs en ETM en fonction de la profondeur et par site	93
5-3-3-1 Comparaison des concentrations en ETM dans les couches superficielles (0-60 cm) du sol des différentes zones d'études.....	94
5-3-4 Facteurs de contrôle de la mobilité des ETM dans le sol.....	101
5-3-4-1 Estimation du facteur d'enrichissement (FE)	101
5-3-4-2 Constituants du sol contrôlant la mobilité des éléments traces métalliques	102
5-3-4-3 Expression des concentrations totales en ETM dans les sols.....	105
5-3-4-3-1 Expression des ETM à Dassoumbié (Korhogo).....	105
5-3-4-3-2 Expression des ETM à Kanguélé (Bondoukou).....	107
5-3-4-3-3 Expression des ETM à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro).....	109
5-3-4-3-4 Expression des ETM à Lauzoua (Guitry)	110
5-4 Cartographie des sols par télédétection.....	112
CHAPITRE VI : DISCUSSION	119
6-1 Caractéristiques morphologiques et physico-chimiques des Cambisols manganésifères issus de matériaux volcano-sédimentaires.....	119
6-2 Distribution des ETM dans les sols manganésifères.....	127
6-3 Cartographie des sols par télédétection.....	131
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	133
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	137
ANNEXES	159

DEDICACE

A ma mère Feue Aya Germaine

A mon père Nanga N'Guessan Jacques et

A ma fille Nangah Aya Flores Laure Abigail

REMERCIEMENTS

Arrivé au terme de ce travail, au moment où cette étude va être jugée, il m'est agréable de remercier ici les organismes et les personnes qui l'ont rendu possible.

Je tiens à remercier, en premier lieu, l'Université Nangui Abrogoua, institution dans laquelle tout mon cursus universitaire s'est réalisé.

Je remercie sincèrement l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF), pour m'avoir accordé un séjour de trois mois en Roumanie, à travers la bourse doctorale « Eugen Ionescu », dans le cadre de cette thèse.

Je remercie très chaleureusement mes deux directeurs de thèse ; professeur SAVANE Issiaka et professeur YAO-KOUAME Albert. Dès le début, puis, pendant ces années de travail, professeur YAO-KOUAME Albert m'a guidé dans toutes les étapes de cette thèse, du travail de terrain à celui de laboratoire, en passant par la phase de rédaction, de manière efficace, tout en me laissant une grande liberté. Il a toujours été disponible. Je voudrais lui témoigner toute ma gratitude pour la confiance qu'il m'a accordée et pour sa grande patience à mon égard. Si j'ai souvent eu l'impression de ne pas être digne de tant de sollicitude, j'espère qu'il est satisfait du résultat.

Saurai-je trouver les mots pour manifester toute ma gratitude au professeur SAVANE Issiaka qui a dirigé ma thèse avec plein de rigueur, de sagesse, de générosité et de gentillesse. Il m'a accueilli dans son laboratoire, m'aidant ainsi à vivre une des expériences les plus enrichissantes de ma vie. Qu'il reçoive ici l'hommage de mes sentiments les plus respectueux.

A la fois critiques et spectateurs privilégiés, les membres du jury de soutenance de cette thèse méritent, eux aussi, une mention spéciale. Je remercie chaleureusement le président du jury, professeur GOURENE Germain, qui a eu la délicate mission d'accorder les différentes voix présentes dans le jury, chacune représentant une discipline distincte de l'univers hétéroclite de la science. Je remercie également, et avec beaucoup d'admiration, les rapporteurs de cette thèse, professeurs CAMARA Mameri et KOUAME Koffi Fernand. Ils ont eu la difficile mission de lire, avec attention, ce manuscrit, chacun, avec un regard différent. Que l'examineur de ce travail, professeur ANGUI Kouassi Tehua Pascal, trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je n'oublie pas ceux dont la participation est plus discrète, mais, dont la contribution n'est pas négligeable : merci sincèrement aux docteurs BALLO Koffi Célestin, KOUAME Kouassi Innocent et YOBOUE Kouadio Emile, pour leurs contributions significatives.

Je remercie très amicalement tous ceux qui m'auront vu et soutenu chaque jour. Merci à YAO Guy Fernand, GUETY Thierry, KOUAKOU Kouassi Josselin, aux docteurs BAKA Derving, KOUAKOU Yao Kouman Nestor, ALUI Konan Alphonse, TEHOUA Lazare et N'GUESSAN Kouamé Antoine.

Merci également à tous les membres du cabinet YKA-Formation.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à mes parents, qui m'ont soutenu durant ces années. Merci à Gérard, Philémon, Annette et Yvette. Ils ont toujours porté un grand intérêt à mes travaux et au bon déroulement de cette thèse. Merci pour leur dévouement et leur amour.

Je remercie également monsieur YAMBA Mel Hilaire et sa famille, qui m'ont soutenu tout au long de ce travail, par leurs encouragements.

Un grand merci à ma petite fée, ZOKOU Marie Dominique, qui m'a accompagné durant ces années de thèse.

LISTE DES ABREVIATIONS

ETM : Eléments traces métalliques

ETM+ : *Enhanced Thematic Mapper plus*

FE : Facteur d'Enrichissement

FPGN : Fonds pédo-géochimique naturel

GPS : “*Global positioning system*” (Système de positionnement global)

IB : Indice de brillance

IC : Indice de couleur

ICP-OES : Spectrophotomètre d'émission atomique couplé à plasma inductif

IUPAC : “*International union of pure and applied chemistry*” (Union internationale de chimie pure et appliqué)

NDVI : Indice de végétation normalisé

SD : Standard deviation (Déviation standard ou Ecart type)

WRB : “*World reference base for soil resources*” (Base de référence mondiale pour les ressources en sols)

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de situation des zones d'étude.	6
Figure 2 : Carte du climat de la Côte d'Ivoire (Anonyme, 2003, modifié).	10
Figure 3 : Esquisse géologique de la Côte d'Ivoire (Kouamelan (1996), modifié).	18
Figure 4 : Carte des sols de Côte d'Ivoire (Perraud, 1971).	24
Figure 5 : Schéma de positionnement des fosses pédologiques par segment topographique.	44
Figure 6 : Distribution fréquentielle de la teinte du sol selon les segments topographiques ($\chi^2=0,013$) dans les 4 sites.	55
Figure 7 : Fréquence des structures pour les différents niveaux topographiques dans les 4 sites ($\chi^2 = 0,022$).	56
Figure 8 : Distribution fréquentielle de la texture en fonction de la topographie dans les 4 sites ($\chi^2=0,59$).	60
Figure 9 : Profils de sol le long de la toposéquence.	61
Figure 10 : Distribution fréquentielle de la teinte selon la zone d'étude ($\chi^2 =$ 0,004).	62
Figure 11 : Distribution Fréquentielle de la structure du sol dans les différentes zones d'études ($\chi^2=0,053$).	63
Figure 12 : Distribution fréquentielle de la texture selon la zone d'étude ($\chi^2= 0,004$).	65
Figure 13 : Variation du pH selon les différents niveaux topographiques et en fonction de la profondeur des sols des 4 sites.	66
Figure 14 : Nuage des variables dans les plans F1-F2, F3-F4 et F5-F6, après rotation de la matrice initiale par varimax normalisé des 4 sites.	84
Figure 15 : Répartition de Cr, Ni, Pb, Co et Cd dans les sols en fonction des segments topographiques dans les sites.	88
Figure 16 : Répartition de Cu et Zn dans les sols en fonction des segments topographiques dans les 4 sites.	89

Figure 17 : Répartition de Fe et Mn dans les sols en fonction des segments topographiques dans les 4 sites.	90
Figure 18 : Variation des teneurs en ETM de la couche 0-60 cm des sols en fonction des segments topographiques des 4 sites.	92
Figure 19 : Evolution des teneurs en Cr, Ni, Pb, Co et Cd en fonction de la profondeur du sol des différents sites étudiés.	96
Figure 20 : Evolution des teneurs en Cu et en Zn en fonction de la profondeur du sol des différents sites étudiés.	97
Figure 21 : Evolution des teneurs en Fe et en Mn en fonction de la profondeur du sol des différents sites étudiés.	98
Figure 22 : Variation des teneurs en Fe, Mn, Cu, Zn, Cr et Ni dans la couche 0-60 cm des sols en fonction des sites d'étude.	99
Figure 23 : Variation des teneurs en Pb, Co et Cd dans la couche 0-60 cm des sols en fonction des sites d'étude.	100
Figure 24 : Carte de répartition des sols sur les différents sites d'étude.	113

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Coordonnées des extrémités des zones étudiées.	5
Tableau II : Teneurs moyennes des éléments dans la croûte continentale supérieure (Wedepohl, 1995).....	27
Tableau III : Teneurs en éléments traces des roches (en mg.kg ⁻¹) (Kabata-Pendias et Pendias, 1992).	28
Tableau IV : Sources d'éléments traces métalliques dans l'environnement (Ross, 1994).	30
Tableau V : Fréquences (%) des valeurs de chroma et de valeur des 4 sites.....	57
Tableau VI : Variation des teneurs (% pondéral) en éléments grossiers, suivant la profondeur du sol, et les segments topographiques des 4 sites.	58
Tableau VII : Variation de la teneur en argile (g.kg ⁻¹) selon la profondeur et la topographique des 4 sites.	59
Tableau VIII : Variation de la teneur en sable (g.kg ⁻¹) selon la profondeur et le segment topographique des 4 sites.....	59
Tableau IX: Variation de la teneur en limon (g.kg ⁻¹) selon la profondeur et le segment topographique des 4 sites.....	60
Tableau X : Teneurs (% pondéral) en éléments grossiers à différentes profondeurs du sol par site d'étude.....	63
Tableau XI : Valeurs moyennes des fractions granulométriques selon le site d'étude.....	64
Tableau XII : Acidité résiduelle (Δ pH) dans les horizons de sol selon la toposéquence.....	66
Tableaux XIII : Teneurs moyennes en éléments caractéristiques de la matière organique selon la topographie et la profondeur des 4 sites.....	68
Tableau XIV : Teneurs moyennes en P total et P ass. selon la topographie et la profondeur des 4 sites.	68
Tableau XV : Valeurs moyennes des cations alcalinoterreux (Ca ²⁺ et Mg ²⁺) en fonction de la profondeur et de la topographie des 4 sites.....	69
Tableau XVI : Valeurs moyennes des teneurs en cation alcalins (K ⁺ et Na ⁺) en fonction de la profondeur et de la topographie des 4 sites.....	70

Tableau XVII : Valeurs moyennes de la CEC et du taux de saturation en bases selon la profondeur et la topographie des 4 sites.	70
Tableau XVIII: Acidité du sol en fonction des sites et de la profondeur.	71
Tableau XIX : Teneurs moyennes du sol en carbone organique, en azote total et en rapport C/N en fonction des sites et de la profondeur.	72
Tableau XX : Variation des teneurs moyenne du sol en P total et en Pass en fonction des sites et de la profondeur.	73
Tableau XXI : Teneurs moyennes du sol en Ca^{2+} et en Mg^{2+} en fonction des sites et de la profondeur.	74
Tableau XXII : Teneurs moyennes du sol en K^+ et en Na^+ en fonction des sites et de la profondeur.	74
Tableau XXIII : Valeurs moyennes des teneurs en S, V et CEC des horizons sur les différents sites.	75
Tableau XXIV : Coefficient de corrélation entre les attributs physico-chimiques des sols du site manganésifère de Dassoumbélé (Korhogo).	77
Tableau XXV : Coefficient de corrélation entre les attributs physico-chimiques des sols du site manganésifère de Kanguélé (Bondoukou).	78
Tableau XXVI : Coefficient de corrélation entre les attributs physico-chimiques des sols du site manganésifère de Toré-Yaokro (Attiégouakro).	80
Tableau XXVII : Coefficient de corrélation entre les attributs physico-chimiques des sols du site manganésifère de Lauzoua (Guitry).	81
Tableau XXVIII : Valeurs propres et inertie des facteurs des 4 sites.	82
Tableau XXIX : Matrice factorielle des horizons des 4 sites sans rotation.	83
Tableau XXX : Moyenne des concentrations totales en ETM (mg.kg^{-1}) dans les sols des 4 sites.	85
Tableau XXXI : Corrélation de Pearson entre les ETM des sols étudiés.	86
Tableau XXXII : Facteur d'enrichissement (FE) en ETM dans les sols des différents sites étudiés.	101
Tableau XXXIII : Coefficients de corrélation de Pearson entre les ETM et les caractéristiques physico-chimiques du sol à Dassoumbélé (Korhogo).	102

Tableau XXXIV : Coefficients de corrélation de Pearson entre les ETM et les caractéristiques physico-chimiques du sol à Bondoukou (Kanguélé).....	103
Tableau XXXV : Coefficients de corrélation de Pearson entre les ETM et les caractéristiques physico-chimiques du sol à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro).....	104
Tableau XXXVI : Coefficients de corrélation de Pearson entre les ETM et les caractéristiques physico-chimiques du sol à Lauzoua (Guitry).	105
Tableau XXXVII : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire simple à Dassoumbélé (Korhogo).	106
Tableau XXXVIII : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire multiple à Dassoumbélé (Korhogo).....	107
Tableau XXXIX : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire simple à Kanguélé (Bondoukou).	107
Tableau XL : Expressions des concentrations des ETM par régression linéaire multiple à Kanguélé (Bondoukou).....	108
Tableau XLI : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire simple à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro).	109
Tableau XLII : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire multiple à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro).....	110
Tableau XLIII : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire simple à Lauzoua (Guitry).	111
Tableau XLIV : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire multiple à Lauzoua (Guitry).	112
Tableau XLV : Matrice de confusion de la classification supervisée par maximum de vraisemblance sur la zone de dassoumbélé (Korhogo).	115
Tableau XLVI : Matrice de confusion de la classification supervisée par maximum de vraisemblance sur la zone de Kanguélé (Bondoukou).	116
Tableau XLVII : Matrice de confusion de la classification supervisée par maximum de vraisemblance sur la zone de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro).	117
Tableau XLVIII : Matrice de confusion de la classification supervisée par maximum de vraisemblance sur la zone de Lauzoua (Guitry).	118

RESUME

Les sols manganésifères sont caractérisés par des teneurs importantes en manganèse (9228 mg.kg^{-1} : valeur moyenne dans les sols de Côte d'Ivoire), qui, associées aux éléments traces métalliques, pourraient avoir des conséquences sur la physico-chimie des sols, et induire de graves dangers sur l'environnement et l'homme. C'est pourquoi, il est apparu nécessaire de procéder à l'évaluation physico-chimique et à la détermination des ETM des sols manganésifères de Côte d'Ivoire. Quatre sites de sols issus de formations volcano-sédimentaires, riches en manganèses, ont été choisis pour conduire l'étude, à travers une analyse toposéquentielle et une analyse de comparaison des sites. Les résultats ont montré que les sols manganésifères sont majoritairement de texture fine (argileuse à limono-argileuse), compensée, dans les horizons humifères, par une structure bien développée et stable (structure polyédriques subanguleuse). Les sols de haut et du moyen versant sont rougeâtres (2,5YR), et ceux du bas versant sont jaunâtre (7,5YR). Les sols sont franchement acides ($\text{pH} < 5,5$). Les taux de saturation en bases, les valeurs moyennes de CEC et les teneurs en matière organique sont faibles. En revanche N et P sont abondants, tout comme K^+ et Mg^{2+} , alors que ces Cambisols sont pauvres en Ca^{2+} . La minéralisation est bonne, avec $8 < \text{C}/\text{N} < 15$. Pour les bases échangeables, il existe un gradient décroissant du Nord (zone de Dassoumblé, région savanicole, climat soudanais) au Sud (zone de Lauzoua, région forestière, climat attiéen). En revanche, pour le taux de matière organique et la CEC, ce sont les systèmes cultureux en présence qui expliquent leur variabilité spatiale. L'analyse des profils de sol a montré que le lessivage et la lixiviation sont les processus majeurs qui gouvernent la distribution des éléments chimiques dans le sol, par la présence d'un horizon d'accumulation en profondeur. Les teneurs en Eléments Traces Métalliques observées suivent l'ordre d'abondance suivant : $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Cd}$ à l'exception de Korhogo où $\text{Ni} > \text{Cr}$. Les teneurs en Cu ($172,8 \text{ mg.kg}^{-1}$), Zn ($110,73 \text{ mg.kg}^{-1}$), Cd ($1,06 \text{ mg.kg}^{-1}$), Mn ($9228,96 \text{ mg.kg}^{-1}$) se situent dans la gamme des teneurs critiques dans les sols, pouvant entraîner des phénomènes de toxicité. Toutefois, la dynamique verticale des ETM est d'une part, gouvernée par la teneur en argile, et d'autre part, par la teneur en carbone. La répartition et les expressions des ETM restent variables selon la zone d'étude, et essentiellement influencés par les processus pédogénétiques. L'utilisation des indices radiométriques dans la spatialisation a été significative dans les zones à faibles couvertures végétales, notamment à Korhogo.

Mots clés : Sols manganésifères, ETM, pH, Volcano-sédimentaire, Indices radiométriques, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

Manganiferous soils are characterized by high contents of manganese (9228 mg.kg⁻¹: average value in soils from Côte d'Ivoire), which, combined with trace elements (ETM) could affect the physico-chemistry of the soil and cause serious risk on the environment and on humans. Therefore, it became necessary to evaluate the physico-chemical and determination of trace element manganiferous soils of Côte d'Ivoire, to better understand their potential usefulness, limitations and establish a sustainable management of these soils. Four sites in soils developed on volcano-sedimentary formations, rich in manganese, under different microclimatic conditions, taking into account regional disparities were chosen. Toposequential analysis and comparison of sites were carried out. The results show that manganiferous soils have fine texture (clay to silty-clay), a well-developed and stable structure. Soils of top and middle slopes are reddish (2.5 YR) and the bottom is yellowish (7.5 YR). The pH are frankly acidic (<5.5). Moreover, base saturation, CEC and organic matter are low. In contrast N and P are better represented as K⁺ and Mg²⁺, while the poor are Cambisols Ca²⁺. Mineralization is good in these soils with 8 <C/N <15. For exchangeable bases, there is a decreasing gradient from the north (Dassoumblé, savanna region, Sudanese climate), South (Lauzoua, forest area, very humid). In contrast, for rates of organic matter and CEC it is the cropping systems in the presence which explain their spatial variability. Further analysis of soil profiles showed that leaching is the major process that govern the distribution of chemical elements in the soil, the presence of a horizon of accumulation in depth. Trace element contents observed follow the order of abundance according to : Fe> Mn> Cu> Zn> Cr> Ni> Pb> Co> Cd. Cu (172.8 mg.kg⁻¹), Zn (110.73 mg.kg⁻¹), Cd (1.06 mg.kg⁻¹), Mn (9228.96 mg.kg⁻¹) and Fe (46 699 mg.kg⁻¹) are in the range of critical concentrations in the soil, which can cause toxicity. However, the vertical dynamics, distribution and prediction models of trace element are very variable according to the study area, and are primarily influenced by pedogenetics processes. The use of radiometric indices in spatialization of manganiferous soil was significant in areas with low vegetation cover, especially in Korhogo.

Keywords: manganiferous Soil, trace element, pH, volcano-sedimentary, radiometric indices, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

Le sol est le support physique et nutritif des êtres vivants à la surface des continents, et, de ce fait, le support de vie de l'homme. Bien que l'homme soit en contact permanent avec le sol, ce dernier reste encore, à bien des égards, une boîte noire dont le fonctionnement n'est encore que partiellement connu. Les sols évoluent en permanence sous l'action combinée des flux de matières et d'énergie, qui, appliqués à un matériel parental, transforment progressivement les minéraux primaires en constituants secondaires (Chadwick et Chorover, 2001 ; Cornu, 2005). Ces interactions permanentes confèrent au sol une variabilité spatiale et temporelle, multi-échelle importante, difficile à appréhender. Cette complexité caractérise les milieux naturels et rend leur étude délicate.

Les sols manganésifères sont le résultat des interactions leur conférant une forte concentration en manganèse. En règle générale, le manganèse se trouve en concentration faible dans la plupart des sols ($<1000 \text{ mg.kg}^{-1}$) (Baize, 1997). Toutefois, certains sols présentent des teneurs élevées en manganèse.

Les sols manganésifères sont décrits comme des sols formés des résidus, provenant de la dissolution acide de roches mères carbonatées, associés à un apport de matériaux allochtones (Foster *et al.*, 2004 ; Bourgault et Rabenhorst, 2011). Leurs propriétés physiques, chimiques et minéralogiques sont fortement influencées par leur teneur en manganèse (Bourgault et Rabenhorst, 2011). Certains sols, exceptionnellement riches en oxydes de Manganèse, ont été formés par l'altération de la dolomite, riche en manganèse (Dowding et Fey, 2007).

En raison de leur caractère chimiquement réactif, les oxydes de manganèse jouent un rôle important dans les sols, car, ils ont une grande surface spécifique, qui leur confère un potentiel de sorption important, de sorte qu'ils ont tendance à retenir les éléments nutritifs et les éléments traces métalliques (ETM) (Dixon et White, 2002 ; Kabata-Pendias et Pendias, 2001).

La rétention des éléments traces dans certains sols manganésifères (Oxisols manganésifères) a été si fortes qu'ils ont été considérés comme contaminés (Dowding et Fey, 2007). En effet, les éléments traces métalliques sont réputés toxiques (Redon,

2009). Plusieurs études ont montré que les sols se comportent, généralement, comme des systèmes accumulateurs des ETM, et que la rétention ou la mobilisation d'un ETM dans le sol est fonction de plusieurs facteurs, lesquels diffèrent selon l'élément considéré et le type de sol (Colinet, 2003 ; Soubrand-Colin, 2004 ; Dère, 2006 ; Bur, 2008). Comme ce comportement accumulateur des sols vis-à-vis des ETM est irréversible (Lamy, 2006 ; Dère, 2006), lorsque ces ETM deviennent mobiles, ils peuvent présenter de sérieux dangers dans l'environnement (Rattan *et al.*, 2005 ; N'Diaye *et al.*, 2006). Aussi, les cultures réalisées sur ces zones pourraient-elles accumuler ces ETM, et avoir des conséquences dans certaines conditions sur la santé des populations qui sont, en majorité, rurales (Jaradat *et al.*, 2010).

En Côte d'Ivoire, les sols manganésifères sont principalement formés sur les complexes volcano-sédimentaires. Ces derniers sont plus ou moins riches en minéraux ferromagnésiens, en minéraux calciques, en plagioclases, en silices et en oxydes, dont l'altération conduit à la formation d'argiles 1/1, 2/1, ou des interstratifiés, marquant ainsi le passage d'un phénomène de bisiallisation à un phénomène de monosiallisation (Yoboué, 2010). En général, les formations volcano-sédimentaires présentent des concentrations importantes en éléments traces métalliques (ETM), avec des teneurs importantes dans les sols qui en résultent (Strieder *et al.*, 2000 ; Bennoua *et al.*, 2004 ; Many et Maboko, 2008 ; Brandt *et al.*, 2009). Les complexes volcano-sédimentaires de Côte d'Ivoire donnent naissance à des sols brunifiés (Cambisols) (Perraud, 1971), habituellement décrits comme des formations pédologiques des zones tempérées et méditerranéennes (Duchaufour, 1997).

Les études pédologiques réalisées sur les sols manganésifères en Côte d'Ivoire ne se sont limitées qu'à la caractérisation morphologique dans la zone Centre Sud de Toumodi (Yao-Kouamé *et al.*, 2010). Ce qui ne permet pas d'appréhender l'ambiance physico-chimique qui règne dans ces sols. De plus, elles n'orientent pas, non plus, à la prise de décision concernant la prévention de potentiels risques et l'adoption de systèmes de cultures adéquats par les populations, qui sont, en majorité, rurales. Pourtant, la non prise en compte des contraintes physiques et chimiques des sols est préjudiciable à l'exploitation de ceux-ci, car, certains paramètres du sol jouent un rôle prépondérant dans la gestion de la nutrition végétale, et, un approvisionnement

adéquat en éléments nutritifs dépend de leur optimisation (Troeh et Thompson, 2005). La connaissance des facteurs limitants constitue un préalable important pour garantir une production agricole efficiente, tant sur les plans agronomique, économique et environnemental, à partir de diagnostics fiables (Dahnke et Olson, 1990 ; Parent et Dafir, 1992).

C'est pourquoi, il est apparu nécessaire de procéder à l'étude physico-chimique des sols manganésifères, en vue de constituer une base de données de référence, permettant de mieux comprendre leur utilité, leurs limites et pour une appréciation rationnelle de l'impact des activités d'exploitation industrielle des zones manganésifères de Côte d'Ivoire sur l'environnement et l'agriculture.

Quatre sites de sols développés sur formations volcano-sédimentaires, riches en manganèse, soumis à différentes conditions microclimatiques, prenant en compte des disparités régionales ont été choisis pour conduire l'étude.

L'objectif général de cette étude est d'approfondir la caractérisation pédologique des Cambisols manganésifères en Côte d'Ivoire de déterminer les teneurs en éléments traces métalliques (ETM) pour une gestion adéquate des sols.

Cet objectif général se décline en des objectifs spécifiques suivants :

- Caractériser les traits morphologiques des Cambisols manganésifères ;
- déterminer les propriétés physico-chimiques fondamentales des sols manganésifères issus de matériau volcano-sédimentaire ;
- évaluer la distribution des éléments traces métalliques dans les sols manganésifères ;
- établir les relations entre les caractéristiques physico-chimiques et les éléments traces dans les sols manganésifères ;
- apprécier la spatialisation des sols manganésifères à l'aide de la télédétection.

Le document est structuré en 3 grandes parties comme suit :

- la première partie aborde les considérations générales, et présente le cadre de l'étude, avec une revue de bibliographie sur les éléments traces métalliques et les sols manganésifères ;
- la seconde partie, répartie entre deux chapitres, expose les matériels et les méthodes ayant servi à la réalisation de l'étude ;

- la troisième partie, en deux chapitres, présente les résultats obtenus appuyés par une discussion ;

Une conclusion générale, assortie de quelques perspectives, une liste de références bibliographiques et des annexes complètent le document.



PREMIERE PARTIE : GENERALITES

CHAPITRE I : CADRE DE L'ETUDE

1-1 Situation géographique des sites étudiés

Le site de Dassoumblé est localisé dans le département de Korhogo, situé dans la partie nord de la Côte d'Ivoire, entre 5°23' et 6°01' W et 9°26' et 9°46' N. Le village de Dassoumblé se situe au Sud-Ouest de la commune de Korhogo, à environ 25 km. Les coordonnées géographiques du site sont 9°23'27''N et 5°48'49'' W.

Le Site de Kanguélé est situé dans le département de Bondoukou, au Nord-Est de la Côte d'Ivoire, de coordonnées géographiques 8°6'43'' N et 2°42'23'' W. Bondoukou se trouve à 416 km de la ville d'Abidjan. Le village de Kanguélé, qui héberge le site d'étude est à 20 km de la commune de Bondoukou au Nord-Est.

Le site de Tokoré-Yaokro se localise dans le département d'Attégouakro, au centre de la Côte d'Ivoire. Attégouakro est situé à environ 230 km au nord d'Abidjan, dans la partie méridionale du « V baoulé ». Tokoré-Yaokro se trouve à l'Est du département d'Attégouakro, à environ 26 km. Les coordonnées géographiques du site sont 6°48' N et 4°58' W.

Le site de Lauzoua est localisé dans la Sous-préfecture de Guitry. L'accès au site se fait en passant par le département de Grand-Lahou, situé à 150 km de la ville d'Abidjan, sur la route longeant le littoral, et dénommée « la côtière ». Environ 50 km séparent Grand-Lahou du village de Dougodou, d'où une voie non bitumée de 7 km conduit au site. Les coordonnées du site sont 5°20'5'' N et 5°23' W.

La figure 1 présente la localisation des différents sites d'études. Le tableau I indique les coordonnées des extrémités gauche et droite des zones prospectées.

Tableau I : Coordonnées des extrémités des zones étudiées.

Site	Extrémité gauche (Haut)		Extrémité droite (bas)	
	Longitude (W)	Latitude (N)	Longitude (W)	Latitude (N)
Dassoumblé	5°49'28"	9°23'57"	5°48'03"	9°22'50"
Kanguélé	2°43'	8°07'47"	2°41'37"	8°06'38"
Tokoré-Yaokro	4°58'39"	6°49"	4°57'16"	6°47'56"
Lauzoua	5°23'25"	5°20'30	5°22'	5°19'23"

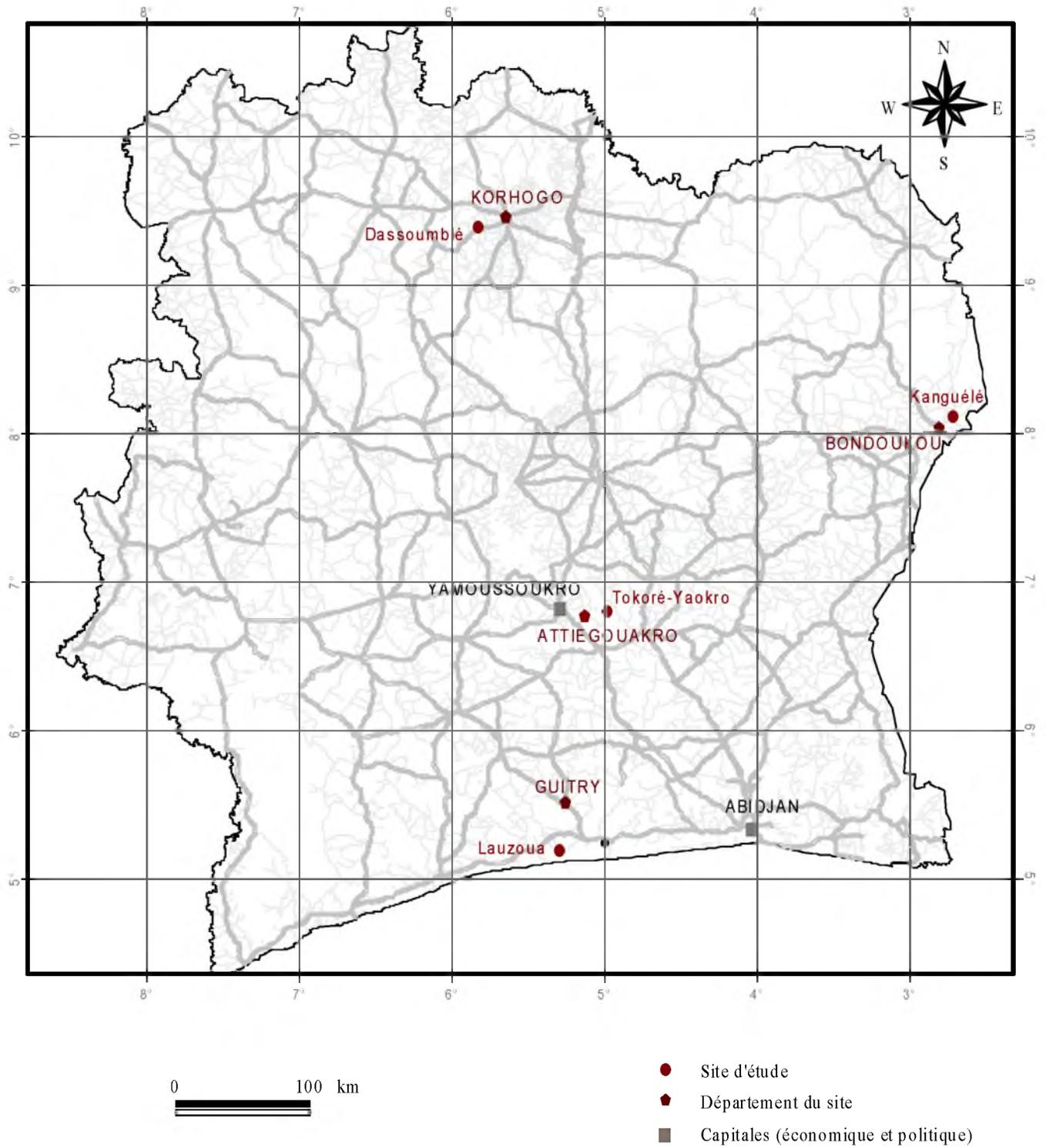


Figure 1 : Carte de situation des zones d'étude.

1-2 Climat

La Côte d'Ivoire appartient au domaine des climats chauds de la zone intertropicale. Le régime pluviométrique est lié au déplacement du Front Inter Tropical (FIT), qui est la zone de rencontre en surface des vents humides du Sud-Ouest (mousson) et des vents secs et chauds du Nord-Est (harmattan) (Tracol, 2004).

Le déplacement du FIT, lié à divers paramètres, crée une zonation Nord-Sud des différentes régions climatiques, qui permet de distinguer, en Côte d'Ivoire, 4 types de climats : le climat « attiéen », au Sud, le climat « baouléen », au Centre, le climat « soudanéen », au Nord et le climat de montagne, à l'Ouest (figure 2).

1-2-1 Climat de Dassoumbié (Korhogo)

Le climat de la zone de Korhogo est de type tropical soudanien à une saison des pluies. Il se caractérise par des pluies agressives et irrégulières, tombant, essentiellement, entre mai et octobre, avec un maximum en août et un minimum en décembre ou janvier. Les pluviométries annuelles varient entre 1000 et 1200 mm, avec des extrêmes compris entre 800 et 2000 mm, au cours des 50 dernières années, et 60 à 120 jours de pluie par an (Albergel, 2007). Au regard des totaux annuels, ce faible nombre de jours pluvieux met en exergue les longues périodes sèches durant lesquelles, chaque année, les besoins en eau pour des activités agricoles (irrigation) et/ou pastorales (abreuvement) sont très importants. Ces besoins sont encore accrus dans le contexte d'épisodes pluviométriques déficitaires, et récurrents, à l'échelle interannuelle. Les sécheresses saisonnières sont marquées entre novembre et avril, quand les faibles précipitations ne compensent plus la demande évaporatoire. Les températures diurnes sont plutôt élevées, comprises entre 20 et 30 °C. De décembre à février, l'harmattan, vent sec du Sahara, souffle régulièrement, transportant des poussières. L'air est alors très sec et les nuits fraîches. Il en résulte une forte demande évaporatoire (l'évapotranspiration potentielle est supérieure à 1300 mm par an dans toute la région) (Albergel, 2007).

1-2-2 Climat de Kanguélé (Bondoukou)

La zone de Bondoukou est dominée par le climat soudanien (de type tropical humide), qui s'apparente au régime équatorial de transition atténué, caractérisé par deux saisons de pluies et deux saisons sèches :

- une grande saison sèche, de novembre à mars ;
- une grande saison pluvieuse, d'avril à juin ;
- une saison sèche intermédiaire, de juillet à août ;
- une petite saison pluvieuse, de septembre à octobre.

La durée de l'ensoleillement est importante pendant les 4 premiers mois de l'année, avec plus de deux cent heures d'ensoleillement, chaque mois. Ce phénomène entraîne la hausse du niveau de la température, qui atteint de fortes valeurs, variant entre 32 et 35°C. La durée de l'ensoleillement la plus courte est observée entre les mois de juillet et août, pendant la période correspondant à la petite saison sèche. Le niveau maximal de l'humidité relative est atteint dans les mois de juin, juillet et août, avec des valeurs dépassant 90 %. Ces valeurs diminuent considérablement en décembre, janvier et février. La pluviométrie varie entre 1100 et 1700 mm/an (Brou, 2005).

1-2-3 Climat de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro)

Le climat, dans cette zone (Attiégouakro) correspond au régime du climat subéquatorial de transition à nuance sèche, assurant le passage entre les climats équatoriaux du Sud à deux saisons des pluies et deux saisons sèches, et ceux tropicaux du Nord à une seule saison des pluies et une seule saison sèche. Il est caractérisé par 4 saisons (Brou, 2005) :

- une grande saison des pluies, de mars à juin ;
- une petite saison sèche (baisse des précipitations), en juillet et août ;
- une petite saison pluvieuse, en septembre et octobre, dont la régularité est en baisse par rapport à la première ;
- une saison sèche très marquée, de novembre à février, comportant toutefois quelques précipitations isolées.

Les précipitations annuelles varient de 850 à 1700 mm, avec un taux d'humidité de 60 à 70 %, et des températures moyennes comprises entre 16 et 34°C (Brou, 2005).

C'est une zone agro-climatique où le déficit hydrique est compris entre 300 et 500 mm/an (Anonyme, 2003). Il s'agit du climat baouléen.

1-2-4 Climat de Lauzoua (Guitry)

La zone de Guitry appartient au climat du Sud de la Côte d'Ivoire, c'est le climat subéquatorial dénommé climat attiéen, caractérisé par deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches d'inégale durée. Ce type de climat se singularise par l'abondance des précipitations (1400 à 2500 mm/an), une température moyenne annuelle de 25 à 33°C, avec un taux d'humidité de l'ordre de 80 à 90 % (Brou, 2005).

La grande saison des pluies s'étend de mars à juillet, avec un maximum en juin, et la petite saison des pluies, d'octobre à novembre. La grande saison sèche s'étend de décembre à février, et la petite saison sèche, d'août à septembre. La température varie très peu.

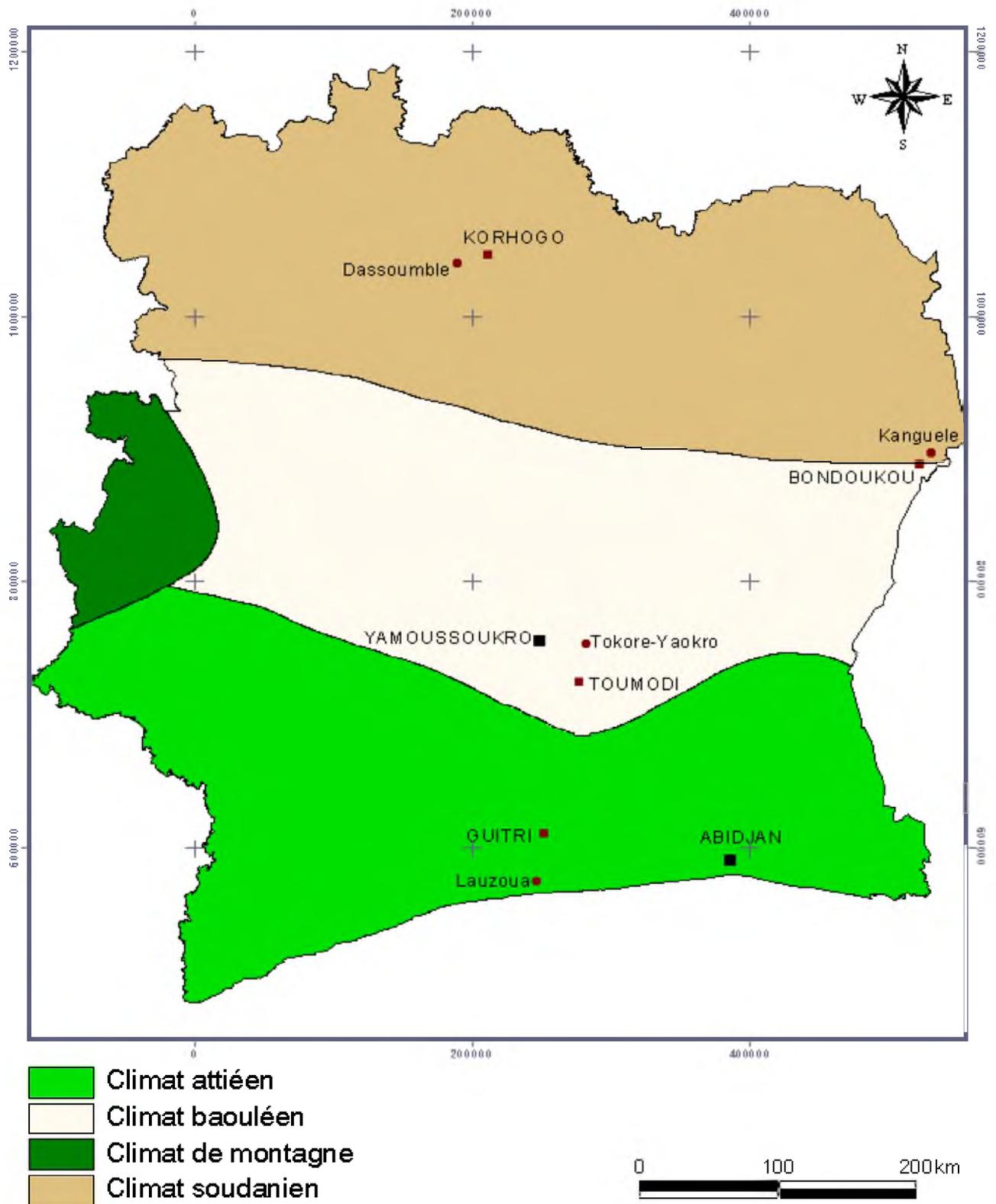


Figure 2 : Carte du climat de la Côte d'Ivoire (Anonyme, 2003, modifié).

1-3 Végétation des zones étudiées

1-3-1 Végétation de Dassoumbélé (Korhogo)

La végétation de la région de Korhogo est essentiellement savanicole : il s'agit de savanes herbeuses, arbustives ou arborées, de forêt galeries et de forêts claires. Selon les travaux de Koné *et al.* (2007), la strate arborée a une taille qui varie de 8 à 20 m et est constituée par *Isoberlinia doka* et *Daniellia oliveri*. Les forêts claires sont à *Isoberlinia doka*. La strate arbustive donne un aspect dense à ces formations. Elle est constituée d'arbustes, le plus souvent, rabougris. On y observe les espèces suivantes : *Combretum glutinosum*, *Combretum molle*, *Detarium microcarpum*, *Diospyros mespiliformis*, *Parkia biglobosa*, *Saba senegalensis*, *Sarcocephalus latifolius*, *Terminalia schimperiana* et *Uapaca somon*, *Bridelia ferruginea*, *Cassia sieberiana*, *Combretum molle*, *Lanea acida*, *Piliostigma thonningii*, *Sarcocephalus latifolius* et *Vitellaria paradoxa*. Le tapis graminéen est plus ou moins continu, et dominé par les herbes : *Andropogon gayanus* et *Imperata cylindrica*. On y rencontre d'autres espèces telles que *Sansevieria liberica* et *Mitracarpus scaber*. Des lianes telles *Periploca nigrescens* et *Strophanthus spp* sont également présentes dans ces formations.

1-3-2 Végétation de Kanguélé (Bondoukou)

La couverture végétale de la zone de Bondoukou comprend des galeries forestières, des forêts claires et des savanes. Des îlots forestiers d'un type particulier ou forêts denses sèches se rencontrent, çà et là, dans l'ensemble de l'aire couverte par les forêts claires. Ces îlots forestiers ne sont jamais très étendus, et sont surtout localisés sur les plateaux, à proximité des villages dont ils indiquent souvent l'emplacement. Des forêts galeries dont les espèces sont exclusives, ou affines de celles des îlots forestiers, existent également. S'agissant des savanes, elles prennent la dénomination de savanes boisées, ou arborées ou de savanes arbustives, ou enfin, de savanes herbeuses, suivant l'importance ou l'absence de peuplement forestier.

Il s'y développe des espèces héliophiles telles : *Elionurus euchaetus*, *Ctenium canescens*, *Cymbopogon proximus*, *Setaria sphacelata*, *Andropogon ivorensis*, *Aristida longiflora*, *Ctenium elegans*, *Elionurus pobeguinii*, *Hyparrhenia gracilescens*,

Loudetia superba, *Cyperus margaritaceus*, *Andropogon tectorum*, *Beckeropsis uniseta*, *Aframomum latifolium*, *Kaempferia aethiopica*, *Costus spectabilis*, *Cissus flavicans*, *Cissus jatrophioides*, *Cissus waterlotii*, *Melanthera elliptica*,

Les espèces les plus représentatives de la strate ligneuse dans la zone sont : *Isoberlinia doka*, *Uapaca togoensis*, *Daniellia oliveri*, *Terminalia glaucescens*, *Cussonia barteri*, *Vitex doniana*, *Crossopteryx febrifuga*, *Parkia biglobosa*, *Securidaca longepedunculata*, *Lophira lanceolata*, *Guiera senegalensis*, *Sclerocarya birrea*, *Bombax costatum*, *Detarium senegalense*, *Detarium microcarpum*, *Isoberlinia dalziei*, *Swartzia madagascariensis*, *Tamarindus indica*, *Oncoba spinosa*, *Strychnos spinosa*, *Strychnos innocua*, *Acacia albida*, *Acacia dudgeoni*, *Acacia goumaensis*, *Ficus gnaphalocarpa*.

1-3-3 Végétation de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro)

La zone d'Attiégouakro appartient au domaine des savanes guinéennes préforestières, correspondant à la zone de transition entre les climats subéquatoriaux et tropicaux. Ce caractère est particulièrement marqué dans la composition floristique, où cohabitent des espèces septentrionales typiques de forêt claire. De nombreux îlots forestiers, dont la physionomie est comparable à celle des forêts denses humides semi-décidues, parsèment la savane plus ou moins boisée (Adjanohoun, 1964). L'on observe la présence de quelques galeries forestières le long des cours d'eau dans la zone.

Les espèces végétales dominantes rencontrées dans la zone d'étude se composent d'espèces ligneuses et d'espèces herbacées. La strate arborée (espèces ligneuses) se compose, principalement, de *Borassus aethiopum*, *Ceiba pentadra*, *Parkia biglobosa*, *Dolichos regia*, *Azadirachta indica*, *Celitis spp.*, *Mansonia altissima*, *Aubrevillea kertingii* et *Kaya grandifolia*. La strate herbacée se compose, majoritairement, de *Imperata cylindrica*, *Chromolaena odorata*, *Ficus exasperata*, *Panicum repens*, *Panicum phragmitoïde*, *Loudetia arundinacea*, et *Sorobolus pectinellus*.

1-3-4 Végétation de Lauzoua (Guitry)

Le couvert végétal est dominé par la forêt dense humide dans cette zone. Cette forêt est néanmoins parsemée de plantations villageoises et industrielles. L'on trouve, par endroits, des forêts marécageuses dans la zone. Les forêts denses humides sempervirentes se composent, majoritairement, de *Lophira alata*, *Anopysis klaineana*, *Dacryodes Klaineana*, *Scottellia chevaliera*. Les forêts marécageuses sont formées essentiellement de *Mitragyna ciliata*, *Symphonia globulifera*, *Xylopia rubescens*, *Uapaca paludosa* et *Spondianthus preussii*. Quelques forêts secondaires peu étendues observées se composent de *Musanga cecropioides*, *Anthocleista nobilis*, *Ricinodendron heudelotii*, *Ceiba pentandra*, *Ficus exasperata*, *Eichornia crassipes*, *salvinia molesta*, *Pistia stratiotes*, *Chromolaena odorata*.

1-4 Relief et hydrographique des zones étudiées

Le relief de la Côte d'Ivoire est peu contrasté, et caractérisé par une sorte de monotonie, même s'il convient de noter que l'altitude croît du Sud-Est vers le Nord-Ouest. On distingue, toutefois, une disposition en « amphithéâtre » des principales unités morphologiques du pays. Le Nord-Ouest, le Nord et l'Est sont occupés par de basses montagnes ; le Centre, par des plateaux et collines, aplatis par une érosion prolongée, et, le Sud est le domaine des plaines sédimentaires (Avenard, 1971).

Le réseau hydrographique qui s'y associe comprend quatre unités :

- quatre fleuves principaux, qui coulent vers le Golfe de Guinée en formant des bassins de drainage parallèles de direction Nord-Sud, à savoir : le Cavally, le Sassandra, le Bandama et la Comoé ;
- sept petits fleuves côtiers dont les bassins versants occupent une superficie inférieure à 10000 km² (le Tabou, le San Pédro, le Niouniourou, le Boubo, l'Agnéby, la Mé et la Bia) ;
- les affluents du Niger, qui coulent du Sud vers le Nord, en drainant l'angle Nord-Ouest du pays (le Baoulé, la Bagoé et le Gbanhala) ;
- les petits affluents de la Volta Noire, dont seul le Kouloua a un écoulement pérenne.

1-4-1 Relief et hydrographique de Dassoumbié (Korhogo)

Le relief de la zone de Korhogo est monotone, avec des altitudes variant en moyenne entre 300 et 400 m. Le modelé général est un ensemble tabulaire de cuirasses ferrugineuses, avec des ruptures en douceur, provoquées par des guirlandes de collines et de buttes aux reliefs arrondis, posées sur des plateaux de hauteurs moyennes (Avenard, 1971).

On observe des inselbergs granitiques, culminant parfois à plus de 500 m d'altitude, une constitution de plateaux latéritiques, avec des croûtes d'altération dont la hauteur varie de 0 à 3 m, témoins d'une ancienne pénéplaine (Jourda *et al.*, 2006). Ces plateaux latéritiques présentent une pente très faible et régulière vers le fleuve Bandama.

La région est essentiellement drainée par le Bandama et ses affluents (le Yoré Lorho, le Solomougou, le Badenou et le Bou), alimentés, chacun, par de nombreuses rivières dont le cours supérieur est souvent intermittent. Les crues se produisent en août, septembre et octobre, et on assiste à un tarissement rapide en novembre et décembre. Les basses eaux s'observent de janvier à mai, avec un débit, alors très faible ou nul. Dans cette région, toutes les rivières importantes montrent de nombreux méandres, pratiquement sur tout leur cours, avec d'abondantes plaines alluviales inondables le long de ces rivières aux cours sinueux.

1-4-2 Relief et hydrographique de Kanguélé (Bondoukou)

On rencontre dans cette zone, des formations géologiques, introduisant un relief plus différencié. Une écharpe de formations birimiennes (schistes, roches vertes, quartzites, dolérites) de direction NW-SE ou N-S provoque une succession de buttes cuirassées, dépassant localement 500 m d'altitude (Youan Ta *et al.*, 2008).

Au niveau hydrographique, la région est arrosée par les affluents de la Comoé et ceux de la volta noire. Les principaux cours d'eau sont le Fako, le Kohodio, le Binéda, le Kolodio et le Koulda. Le régime hydrologique est caractérisé par une crue unique en août-septembre-octobre, suivie d'un tarissement rapide en novembre-décembre, puis,

d'une longue période de basses eaux, de janvier à mai, au cours de laquelle le débit tombe à une très faible valeur.

1-4-3 Relief et hydrographique de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro)

Le relief de la région se compose de collines et de pénéplaines. Les collines forment, généralement, de petits ensembles ou massifs, séparés les uns des autres par des zones de basses altitudes, comparables à de petites pénéplaines en forme de couloir.

Avenard (1971) définit deux types de collines dans cette région, à savoir : la chaîne baoulé et les reliefs tabulaires.

➤ La « chaîne baoulé »

La série de reliefs prenant en écharpe une grande partie de la Côte d'Ivoire traverse cet ensemble en diagonale, et est, parfois, désignée par l'appellation « chaîne baoulé ». Elle correspond à un système peu élevé de rides et de collines, dues à un matériel, essentiellement, schisteux, avec de nombreuses passées de roches vertes et de quartzites. S'étendant du mont Kokumbo au Sud-Ouest, jusqu'à Fêtékro au Nord-Est, elle épouse parfaitement la direction birrimienne et offre toute une gamme de hauteurs plus ou moins importantes, isolées ou groupées en alignements, parfois, assez bien raccordées à la pénéplaine, ou, quelquefois, entourées de glacis cuirassés.

➤ Les reliefs tabulaires

Les reliefs tabulaires, témoins des surfaces d'érosion plus anciennes, tels que l'Orumbo-Boka, le mont Dido, le Kokumbo, le Blafo-Gueto, les principaux sommets du Yaouré, constituent les points culminants du pays baoulé (450-500 m) et dominent puissamment les pays alentours.

Le réseau hydrographique est essentiellement caractérisé par la présence des rivières N'Zi, Kan et leurs affluents, tous tributaires du Bandama. Les bassins de ces cours d'eau constituent de vastes plaines, très propices à la riziculture. L'on peut signaler aussi l'existence, dans cette zone, de petites rivières à régime intermittent, ainsi que, la présence de lacs artificiels où viennent s'abreuver les animaux.

1-4-4 Relief et hydrographique de Lauzoua (Guitry)

Cette zone littorale est caractérisée par une série de plaines et de bas plateaux, dont l'altitude s'élève, légèrement, d'Ouest en Est. Les bas plateaux forment des surfaces horizontales mal drainées, surplombant parfois l'arrière pays schisteux d'un rebord abrupt (Avenard, 1971). A leurs pieds, les plaines alluviales sont de faibles extensions et se localisent autour des lagunes, ou sur le cordon littoral.

Trois rivières principales (Go, Boubo et Nyouzoumou) coulent du Nord au Sud. L'ensemble du réseau hydrographique est, généralement, dendritique, mais, certains collecteurs sont rectilignes. De la latitude 5°4' à la mer, les principaux collecteurs sont méandriques. Toutes les rivières se jettent, d'Ouest en Est, dans les lagunes Tagba, Makey, Tadio, Nyouzoumou, N'gni et Katibo.

1-5 Contexte géologique

La Côte d'Ivoire se situe, au Sud du craton Ouest-Africain, et dans la partie méridionale de la dorsale de Man. Elle est constituée, sur la base géochronologique, de l'archéen (Kénéma-Man), d'une zone de transition, et du paléoprotérozoïque (Baoulé-Mossi) (Boher *et al.*, 1992 ; Kouamelan, 1996).

Toutes les zones où le présent travail a été réalisé appartiennent au domaine Baoulé-Mossi, et sont disposées, principalement, sur les complexes volcano-sédimentaires de la Côte d'Ivoire.

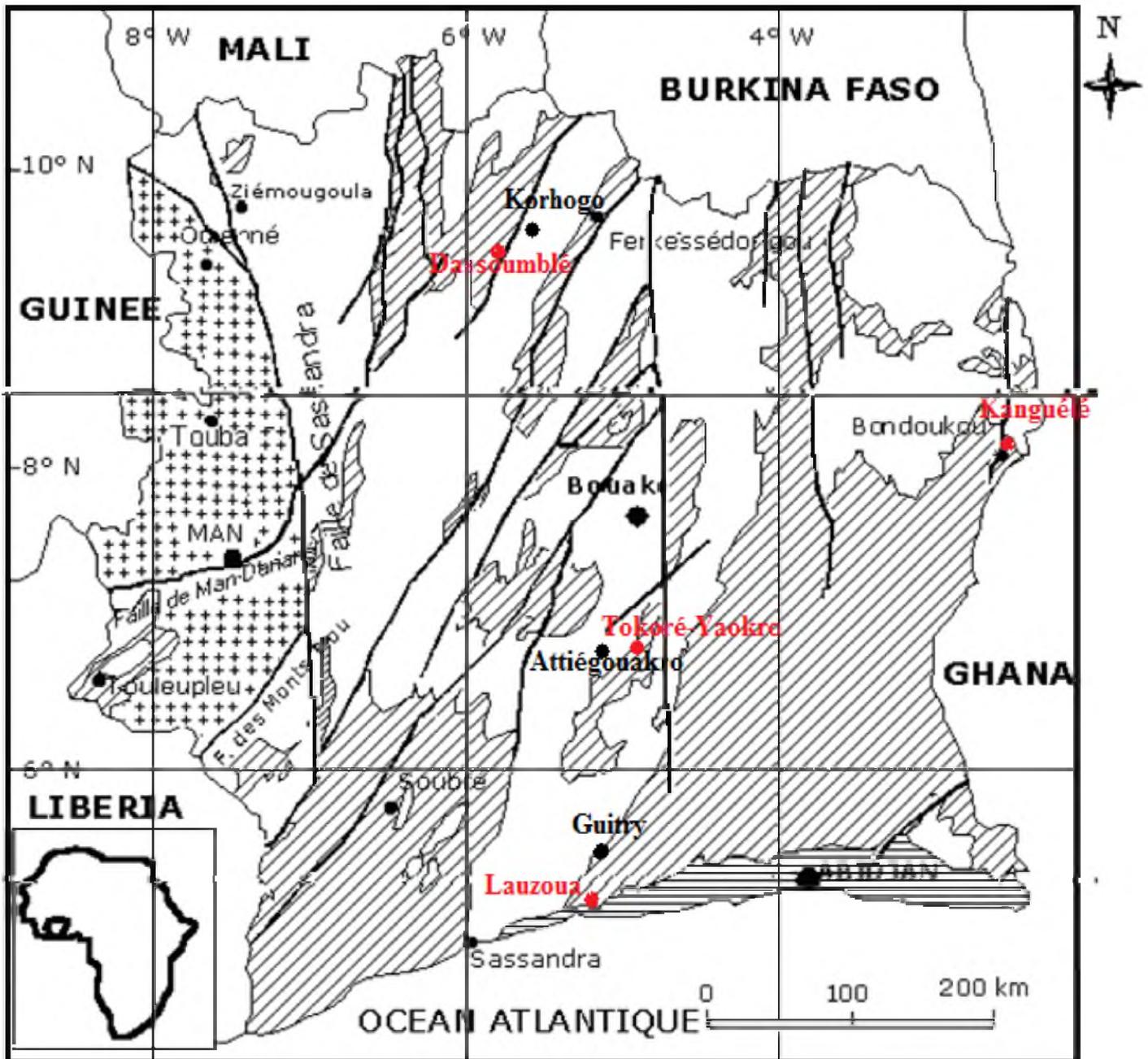
Attribuées au birrimien, les formations volcano-sédimentaires de la Côte d'Ivoire font alterner des roches volcaniques basiques avec les sédiments qui leur sont associés : il s'agit d'un volcanisme de type ophiolitique, caractéristique de la phase initiale des géosynclinaux. Le mode de mise en place du volcanisme serait orogénique, dans un contexte tectonique en extension, en liaison avec l'ouverture d'un rift en milieu ensialique, à travers une croûte continentale amincie, suivant un modèle similaire à celui de Kröner, pour les formations précambriennes (Alric, 1990).

Ces roches ont été faiblement métamorphosées, et constituent un ensemble qu'il est difficile de séparer, du fait de leur étroite association dans le substrat, des principaux reliefs: Monts Langosou, Alébouma, Diédka et Blafo-Guétou. L'ensemble

des roches volcano-sédimentaires affleure selon une bande de direction NNE-SSW, dont la morphologie tranche nettement par rapport à celle des granites environnants : les structures microlithique et microgrenue des roches leur confèrent une bonne résistance à l'altération, que renforcent encore les puissantes cuirasses aluminoferrugineuses dont certains sommets ont hérité. Les complexes volcano-sédimentaires sont constitués de stock de gabbros, des empilements de dolérites et de basaltes sub-aquatiques, associés à des sédiments fins, des épanchements sub-aériens d'andésites et de rhyodacites, associés à des pyroclastites, des grauwwacks et des dépôts grésopélitiques. Le contenu de ces complexes volcano-sédimentaires a été réinterprété, en terme de roches vertes d'une part, et de bassins sédimentaires, d'autres part (Pouclet *et al.*, 1996 ; Doumbia, 1997). L'ensemble volcano-sédimentaire (figure 3) est essentiellement représenté par les formations cristallophylliennes, dont les schistes birrimiens intrudés par plusieurs générations de granitoïdes (granite, granodiorite à biotite), comportant de nombreux filons de quartz et de pegmatite (Yao *et al.*, 1995).

Les complexes volcano-sédimentaires donnent naissances à plusieurs types de sols que sont les Andosols, les Cambisols et les Ferralsols (Quantin *et al.*, 2007).

Les Cambisols en Côte d'Ivoire ont été localisés par Dabin *et al.* (1960) en gisements intrazonaux, sur les affleurements de roches vertes (amphibolites) et de dolérites, dans les chaînes métamorphiques birrimiennes, à partir de la limite Sud des Ferrisols, en direction des régions soudaniennes. Les Cambisols accompagnent donc les bandes de roches du « complexe volcano-sédimentaire. Cette disposition structurale fait l'originalité des « chaînes » de Sifé, d'Oumé à Fêttékro et de la haute Comoé, ainsi que celles des régions du Yaouré et de Bondoukou (Perraud et De la Souchère, 1969 ; Duchaufour, 1977).



LEGENDE

ARCHEEN



PALEOPROTEROZOIQUE

Formations éburnéennes
volcano-sédimentaire

Granitoïdes éburnéens

BASSIN SEDIMENTAIRE



Faïlle

Figure 3 : Esquisse géologique de la Côte d'Ivoire (Source : Kouamelan (1996), modifié).

1-6 Sols

1-6-1 Cambisols

Les Cambisols sont des sols jeunes mettant en évidence une altération relative du matériau parental (WRB, 2006). Ils sont caractérisés par un humus de type mull, modérément acide. Ces sols sont donc marqués par le processus de brunification qui est la libération d'hydroxyde de fer (FeOH) au cours de l'altération des minéraux silicatés par hydrolyse acide. Les Cambisols offrent généralement un profil de type A(B)C ou ABC, dans lequel l'horizon A, superficiel est un mull, et l'horizon B d'altération est coloré en brun par les hydroxydes de fer (Duchaufour, 1997). Ils se retrouvent un peu partout sur le globe terrestre, sur différents types de matériaux ; ils sont de compositions très variées, à condition qu'ils soient bien drainés, et qu'ils contiennent une quantité suffisante de fer libre. Les études réalisées à travers le monde ont révélé que ces sols naissent sous un climat tempéré ou méditerranéen, sur les roches sédimentaires ou métamorphiques (Lamouroux, 1979), sur les granites (Bech *et al.*, 1983), sur les roches volcaniques tendres comme les basaltes, les tufs ou les scories (Bech, 1985), sur les roches volcaniques meubles qui sont les projections cendreuses, ponceuses, andésitiques ou dacitiques (Jamet, 1987), sur les matériaux calcaires, marneux ou gréseux (Duchaufour, 1997). Dans la zone intertropicale humide, les Cambisols se rencontrent aussi et surtout, sur des dépôts alluvionnaires riches en minéraux altérables (Maignien, 1963), sur des roches volcaniques (Jamet, 1987), sur des roches cristallines basiques ou ultrabasiques (Duchaufour, 1997).

Les Cambisols sont beaucoup influencés par le climat sous lequel ils se développent. Leur évolution conduit le plus souvent aux podzols, lorsque nous nous situons en région tempérée, et aux sols lessivés, quand nous nous trouvons dans la zone intertropicale humide (Duchaufour, 1997).

Les Cambisols tropicaux sont liés à la présence de roches basiques. Les conditions d'altération de ces roches pauvres en quartz ne donnent qu'une trame résiduelle et, celles de l'érosion, activées avec la topographie qui les porte, font que ces sols sont remarquablement peu profonds. La conception modale définit les Cambisols comme des sols automorphes, c'est-à-dire développés en position de bon

drainage externe et interne, à structure de surface excellente (Maignien, 1963), à structure petite à moyenne en profondeur, structure cubique à polyédrique moyenne (Kissou *et al.*, 2000). Ce sont des sols à potentiel agronomique satisfaisant, caractéristiques de la zone intertropicale humide (Perraud, 1971), dont la richesse en éléments nutritifs provient des débris végétaux de la forêt sempervirente.

Les Cambisols tropicaux se situent toujours en tête d'une évolution, et ce, dans un contexte dynamique. Avec le temps et suivant les conditions locales, où interfèrent climat et drainage, ils donneront peu à peu naissance à des sols ferrugineux tropicaux ou à des Ferrasols quand ils sont en position automorphe, à des Vertisols lorsqu'ils sont en position hydromorphe (Maignien, 1963). Ces sols sont les meilleurs de Côte d'Ivoire, malgré les problèmes que pose leur situation en topographie accidentée. Dabin *et al* (1960) les ont localisés en gisements intrazonaux sur les affleurements de roches vertes (amphibolites) et de dolérites, dans les chaînes métamorphiques birrimiennes, à partir de la limite sud des Lixisols, en direction des régions soudaniennes. Les Cambisols de la Côte d'Ivoire accompagnent donc les bandes de roches du « complexe volcano-sédimentaire », où ils sont associés aux Ferrasols habituels. Cette disposition structurale fait l'originalité des « chaînes » de Sifé, d'Oumé à Fèttèkro et de la haute Comoé, ainsi que celles des régions de buttes du Yaouré et de Bondoukou (Perraud *et De la Souchère*, 1969 ; Duchaufour, 1977).

1-6-2 Sols manganésifères

Les sols manganésifères se retrouvent sur différents types de matériaux ; ils sont de compositions très variées, à condition qu'ils contiennent une quantité très élevée de manganèse.

Le manganèse est un élément essentiel dans la nutrition des plantes. Il peut être à la fois toxique ou déficient, dans le sol, en fonction de la concentration totale disponible et des conditions chimiques courantes. Le manganèse est omniprésent dans les sols partout dans le monde, mais généralement à des teneurs faibles, moins de 1000 mg.kg⁻¹. Les sols manganésifères sont les sols contenant des teneurs inhabituelles en manganèse, largement au dessus de 1000 mg.kg⁻¹ (Dixon et White, 2002).

Les études réalisées ont montré l'existence de ces sols aux Etats-Unis, sur roches carbonatés (Bourgault et Rabenhorst, 2011), sur roches basaltiques, dans les îles Hawaï (Soil Survey Staff, 2008), sur dolomite en Afrique du Sud (Dowding et Fey, 2007). En Afrique centrale, la présence de ces sols a été signalée par Edou-Minko *et al.* (2003) au Gabon.

Selon les travaux de Dowding et Fey (2007), le manganèse est mobilisé à la surface des sols manganésifères, probablement, en raison du milieu réducteur créé par la couche riche en matière organique. Ce manganèse mobilisé passe ensuite à travers le sol, jusqu'à précipitation, à un nœud de potentiel redox élevé. La zone de potentiel d'oxydo-réduction élevé devient alors enrichie en Mn, tandis que dans la zone de faible potentiel d'oxydo-réduction, le manganèse est éliminé de la matrice du sol, par dissolution (Dowding et Fey, 2007).

La morphologie des sols manganésifères est assez variée, mais il y a certaines tendances générales. Les horizons A et B sont de couleur plus claire (bien que toujours sombre), et présentent des caractéristiques pédologiques telles que des films d'argiles et des nodules manganifériques (Bourgault et Rabenhorst, 2011). Les nodules contenus dans les sols manganésifères sont formés par un enrichissement en manganèse et en fer, et sont, progressivement, redistribués dans le sol. Les zones fortement tachetées sont des indicateurs de la formation de nodules naissants (Dowding et Fey, 2007). Les sols manganésifères sont caractérisés par une acidité, une pauvreté en ions basiques, une toxicité aluminique et/ou manganique (Edou-Minko *et al.*, 2003). En raison de leur faible densité apparente, ils sont définis comme des sols à problème hydrique (Robinette *et al.*, 2004).

La caractéristique principale des sols manganésifères est leur concentration élevée en oxydes de Mn et en oxydes de fer. Les oxydes de manganèse se trouvent dans des conditions d'oxydation du sol, où Mn III et Mn IV sont stables. Lorsqu'elles sont concentrées, Mn III et Mn IV sont visibles sous forme de nodules brun-noir, de concrétions ou de masses gazeuses d'hydroxydes et/ou d'oxydes de Mn (III, IV), souvent en association étroite avec les hydroxydes et/ou les oxydes de Fe III (Bourgault et Rabenhorst, 2011). Bien qu'il y ait une plus grande quantité de Fe que de

Mn dans les sols manganésifères, les oxydes de manganèse ont une plus forte capacité de pigmentation.

Les sols manganésifères montrent un enrichissement en éléments traces, compte tenu de la forte affinité entre les oxydes de manganèse et certains éléments traces métalliques. Ces éléments traces métalliques peuvent s'accumuler dans le sol, en association avec des oxydes de Mn, au cours de l'altération (Dixon et White, 2002). Par exemple, en Afrique du Sud, les sols manganésifères sont naturellement enrichis en éléments divalents Ni, Co, Zn, Cu, et Pb (Dowding et Fey, 2007). Le zinc, le nickel, le cobalt et le plomb sont connus pour avoir une forte affinité pour les oxydes de Mn (Kaaba Pendias et Pendias, 2001).

Le manganèse est considéré comme assez mobile dans de nombreux sols acides (Kabata-Pendias et Pendias, 2001), ce qui rend biodisponibles les éléments traces qui lui sont associés

1-6-3 Sols des zones étudiées

Les sols les plus représentatifs de la Côte d'Ivoire sont ferrallitiques (Ferralsol) (Perraud, 1971) (figure 4). D'autres types de sol ont été mentionnés par plusieurs auteurs (Perraud, 1971; Yao-Kouamé, 2008a), en particulier les sols bruns eutrophes (CPCS, 1967), dénommés Cambisols (WRB, 2006). Ces Cambisols sont localisés en gisement intra-zonaux, sur les affleurements de roches vertes (amphibolites), notamment, des dolérites, dans les chaînes métamorphiques birrimiennes du complexe volcano-sédimentaire.

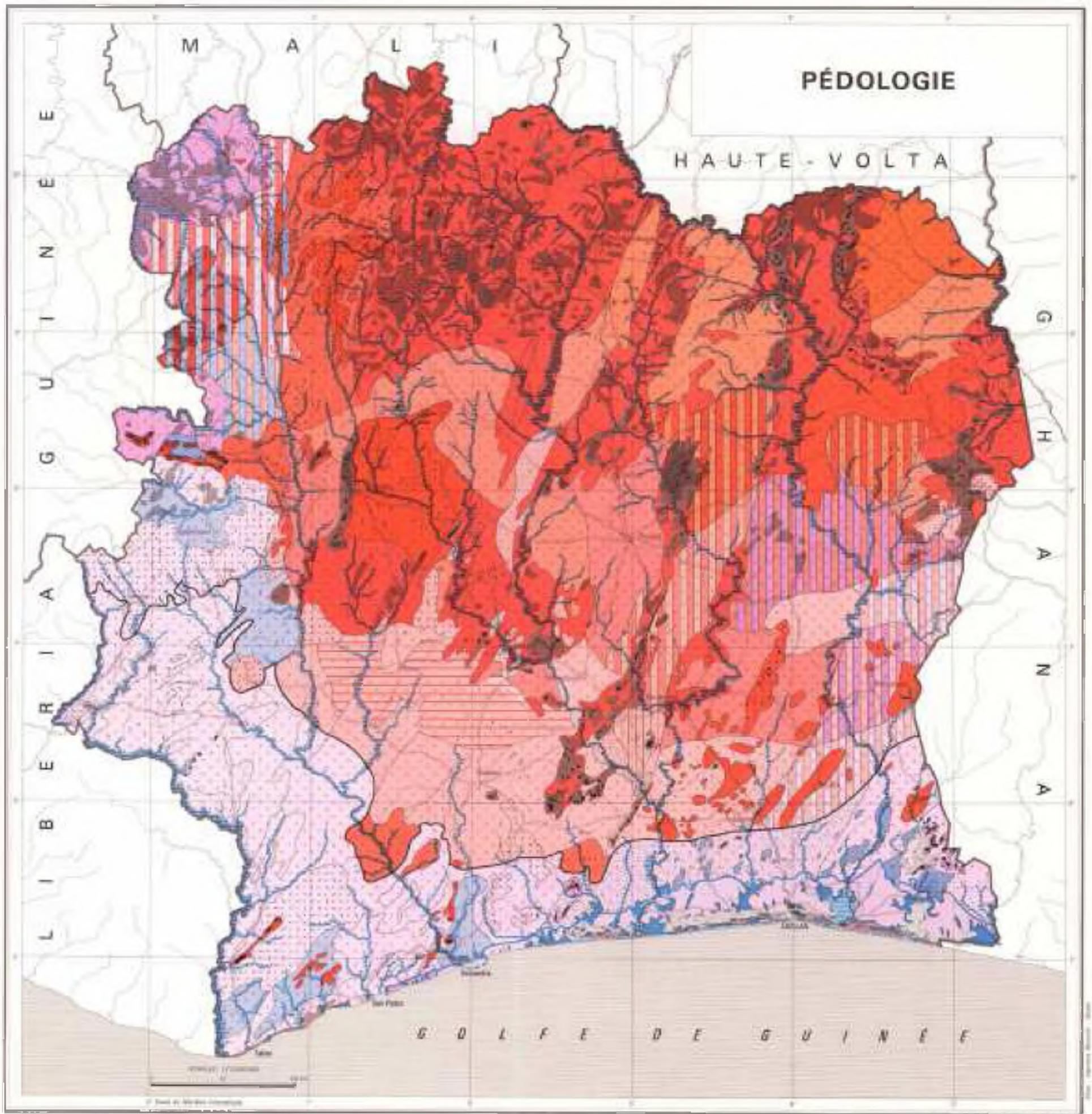
Dans la région de Korhogo, les Cambisols sont situés en position de sommet de collines, de versant et de bas de versant, sur modelé accidenté, dans les massifs de roches basiques. Ils sont caractérisés par une structure polyédrique subanguleuse et par une couleur brun rouge, qui traduit une importante libération des sesquioxydes. Les processus d'accumulation du fer et du manganèse sont plus intenses et se traduisent par des concrétions noires et/ou rouilles plus ou moins dense. Les Cambisols, en position basse et sur pente faible, peuvent être utilisés pour la culture du coton, les

cultures vivrières et maraîchères, le tabac ; le facteur limitant étant l'eau utile pour les plantes (Perraud, 1971).

Dans la zone de Bondoukou, les Cambisols ont été observés, avec une forte teneur en argile gonflante ; la fraction limon est également importante. Ces sols sont localisés en gisements intra-zonaux, sur les affleurements de roches vertes (Perraud, 1971). Ce sont des sols caractérisés par une structure nettement polyédrique et une relative richesse en éléments chimiques. Les concrétions ferrugineuses sont de petite taille, arrondies et souvent riches en oxydes de manganèse.

Les Cambisols de la zone d'Attiégouakro sont relativement profonds, bien structurés (structure polyédrique subanguleuse), de texture argilo-sableuse à sablo-argileuse, très pourvus en éléments grossiers. Ils sont essentiellement marqués par des processus pédogénétiques de remaniement et de rajeunissement (Nangah, 2007 ; Yao-Kouamé, 2008a). Les éléments grossiers dont sont constitués ces sols sont, en majorité, ferrugineux et/ou manganésifères (Yao-Kouamé, 2007). Leur abondance dans les sols constitue une contrainte à l'exploitation agricole. Les couleurs sont à dominance de teintes 2,5YR, 5YR, 7,5YR et 10YR, de valeurs de chroma et de valeur fréquemment identifiées, respectivement, à 4 et 3 (Yao-Kouamé *et al.*, 2010). La relative richesse de ces sols en certains éléments serait héritée du matériau parental (Yao-Kouamé, 2008b).

Les Cambisols de la zone de Guitry (Lauzoua) sont profonds, meubles malgré la présence de concrétions ferrugineuses. Les fortes teneurs en Ca^{2+} et Mg^{2+} sont une des caractéristiques essentielles de ces sols. La fraction argileuse est constituée de kaolinite (30 à 50 %), d'illite et de montmorillonite. Dans les fonds de vallées, des Gleyic Cambisols, à texture hétérogène et à faibles propriétés chimiques, sont observés (Perraud, 1971).



Légende

SOLS FERRALLITIQUES

SOLS FERRALLITIQUES FORTEMENT DESATURÉS

- Sols appauvris (en argile)
- Sols remaniés
- Sols remaniés et appauvris
- Sols remaniés et rajeunis
- Sols remaniés et indurés
- Sols remaniés ou typiques
- Sols typiques (ou rajeunis)

SOLS FERRALLITIQUES MOYENNEMENT DESATURÉS ET/OU FAIBLEMENT DESATURÉS

- Sols remaniés
- Sols remaniés et appauvris
- Sols remaniés et rajeunis
- Sols remaniés à recouvrement
- Sols remaniés faiblement indurés et appauvris
- Sols remaniés et indurés
- Sols remaniés ou typiques avec induration
- Sols remaniés ou typiques
- Sols typiques (ou rajeunis)

COMPLEXE DE SOLS FERRALLITIQUES FAIBLEMENT DESATURÉS ET DE SOLS BRUNS TROPICAUX

Sols remaniés ou typiques avec induration et sols bruns eutrophes

SOLS FERRUGINEUX SUR MATÉRIAUX FERRALLITIQUES

- Sols remaniés concrétionnés et hydromorphes
- Sols remaniés faiblement indurés
- Sols remaniés et indurés

COMPLEXE DE SOLS PODZOLIQUES ET DE SOLS FERRALLITIQUES

Sols podzoliques à gley et pseudopodz. de nappe, et sols ferrallitiques appauvris

SOLS HYDROMORPHES ORGANIQUES

Sols humides à gley et sols tourbeux

COMPLEXE DE SOLS HYDROMORPHES MINÉRAUX ET DE SOLS PEU ÉVOLUÉS

Sols hydromorphes à gley et à pseudogley et sols peu évolués d'apport

SOLS PEU ÉVOLUÉS

Sols peu évolués d'apport_Sables marins

SYMBOLES

- Présence de buttes cuirassées et de sols lithiques sur cuirasse et carapace
- Cuirasses sommitales bauxitiques ou ferrugineuses anciennes
- Limite Nord des sols ferrallitiques fortement désaturés

SUBSTRATUM GÉOLOGIQUE

- Granites calcoalcalins
- Granodiorites - norites
- Shistes - mioashistes
- Gneiss
- Roches basiques
- Inselberg
- Grès
- Limite Nord du bassin sédimentaire
- Sables tertiaires

Figure 4 : Carte pédologique de la Côte d'Ivoire (Source : Perraud, 1971)

1-7 Activités agricoles

Les zones étudiées sont caractérisées par une intense activité agricole. Dans la zone de Korhogo, la principale culture industrielle est le coton, dont les surfaces cultivées n'ont cessé de croître pour atteindre 271 000 ha en 2002 (correspondant à une production en coton graine supérieure à 361 000 t, selon Bassett (2002)). Hormis le coton, les populations rurales des savanes de Korhogo pratiquent plusieurs spéculations (Ouattara, 2001) que sont : les cultures vivrières (igname, maïs, riz, arachide, mil, sorgho, patate douce, niébé, fonio); les cultures annuelles de rente (tabac, cultures maraîchères, soja, canne à sucre) ; les cultures pérennes de rente (manguier, avocatier, agrumes, anacardier) ; l'élevage de bovins, caprins, porcins, ovins, volaille, ainsi que la pisciculture et l'apiculture. Les cultures maraîchères à usage domestique et, de plus en plus fréquemment, à vocation marchande d'une part, les productions arborées, d'autre part, contribuent à l'anthropisation des paysages, sur les versants, comme dans les bas-fonds (Gourdin *et al.*, 2007).

La zone de Bondoukou est spécialisée dans les cultures du manioc, de l'anacardier et surtout de l'igname. Par ailleurs, le passé forestier du Sud de la zone a permis de disposer de quelques hectares de caféiers et de cacaoyers. Les cultures vivrières y sont beaucoup développées.

Quant au secteur d'Attégouakro, l'on y pratique des cultures vivrières tels la banane, l'igname, le manioc..., ainsi que des cultures pérennes (Café, Cacao), s'y ajoute l'élevage de bovins, d'ovins, de caprins et de volailles.

A Guitry, l'on observe des vergers de cacaoyers, de palmiers à huile, d'hévéas, à coté de cultures vivrières annuelles tels que l'aubergine, le gombo, la tomate, le bananier et le manioc.

En plus des activités agricoles, le secteur minier est en plein essor dans les zones étudiées, en particulier, l'exploitation de gisements de manganèse, dans les zones de Bondoukou et de Guitry.

CHAPITRE II : ELEMENTS TRACES METALLIQUES (ETM)

2-1 Définition et concept clé

Les ETM sont des éléments minéraux réputés toxiques, incluant des métaux et des métalloïdes, naturellement présents dans les sols et les roches, en faibles concentrations (Redon, 2009).

Baize (1997) désigne, conventionnellement, par Eléments Traces Métalliques (ETM) « tous les 80 éléments chimiques, constituants de la croûte terrestre continentale, dont la concentration est, pour chacun d'entre eux, inférieure à 0,1 %. Ils ne représentent, à eux tous, que 0,6 % du total.

Bien que les ETM soient considérés comme des polluants, il est important de rappeler qu'ils sont des substances naturelles. A l'opposé des polluants organiques, les ETM ne peuvent pas être classés en composés plus petits et moins toxiques, ils sont, de ce fait, non biodégradables (Bur, 2008).

Le terme « métaux lourds » est souvent employé pour désigner les métaux et métalloïdes associés à une contamination et un potentiel toxique ou écotoxique. Cependant, ce terme n'a jamais été défini par un organisme faisant autorité comme l'IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) (Duffus, 2002).

En général, les métaux lourds sont des éléments ayant une masse volumique supérieure à 5 g.cm^{-3} et précipitant avec les sulfures. Or, certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement lourds (cas du zinc), alors que d'autres éléments toxiques ne sont pas tous des métaux : c'est le cas de l'arsenic. Aussi, est-il préférable d'utiliser le terme « Eléments Traces Métalliques (ETM) », plutôt que celui de métaux lourds (Gounou, 2008).

2-2 Origine des éléments traces métalliques

2-2-1 Sources naturelles

Les éléments traces métalliques sont des constituants de l'écorce terrestre. Les teneurs couramment observées dans la croûte terrestre sont indiquées dans le tableau II. Baize (1997) définit ainsi le fonds pédo-géochimique naturel (FPGN), comme étant la teneur

en un élément dans le sol, résultant des processus d'héritage de la roche mère, de transfert pédologique et du cycle biogéochimique, en dehors de tout apport d'origine humaine. Les teneurs naturelles dans les sols dépendent donc des teneurs observées dans les roches mères, appelées communément fonds géochimique.

Selon les familles de roches, les teneurs en ETM sont variables. Des teneurs moyennes dans les roches sont présentées par Kabatas-Pendias et Pendias (1992) au tableau III. Ce tableau illustre bien l'importance potentielle du facteur lithologique dans la variabilité des teneurs en ETM dans les sols. Il y aurait une richesse relative des roches magmatiques basiques en ETM, notamment Cr, Co, Cu, Ni et Zn (Alloway, 1990).

Tableau II : Teneurs moyennes des éléments dans la croûte continentale supérieure (Wedepohl, 1995).

Elément	Teneur (mg.kg ⁻¹)	Elément	Teneur (mg.kg ⁻¹)	Elément	Teneur (mg.kg ⁻¹)
Si	303480	Cr	35	U	2,5
Al	77440	La	32,3	As	2
Fe	30890	b	26	Br	1,6
Ca	29450	d	25,9	Yb	1,5
K	28650	Li	22	Ta	1,5
Na	25670	Y	20,7	Ge	1,4
Mg	13510	Ni	18,6	Mo	1,4
C	3240	Pb	17	I	1,4
Ti	3117	B	17	W	1,4
S	953	Cu	14,3	Eu	0,95
Ba	668	Ga	14	Tl	0,75
P	665	Co	11,6	Ho	0,62
Cl	640	Th	10,3	Tb	0,5
F	611	Sc	7	Sb	0,31
Mn	527	Pr	6,3	Lu	0,27
Sr	316	Hf	5,8	Bi	0,123
Zr	237	Cs	5,8	Cd	0,102
Rb	110	m	4,7	Se	0,083
N	83	Be	3,1	In	0,061
Ce	65,7	y	2,9	Hg	0,056
V	53	d	2,8	Ag	0,055
Zn	52	Sn	2,5		

Tableau III : Teneurs en éléments traces des roches (en mg.kg⁻¹) (Kabata-Pendias et Pendias, 1992).

Eléments	Roches magmatiques			Roches sédimentaires		
	Roches basiques	Roches intermédiaires	Roches acides	Roches argileuses sableuses	Grès	Carbonates
Cd	0,13-0,22	0,13	0,09-0,20	0,22-0,30	0,05	0,035
Co	35-50	1,0-10	01-7	11-20	0,3-10	0,1-3,0
Cr	70-200	15-50	4-25	60-100	2-40	5-16
Cu	60-120	15-80	10-30	40	5-30	02-10
Hg	0,0x	0,0x	0,08	0,18-0,40	0,04-	0,04-0,05
Mn	120-2000	500-1200	350-600	500-850	100-	200-1000
Mo	1,0-1,5	0,6-1,0	01-2	0,7-2,6	0,2-0,8	0,16-0,40
Ni	130-160	5-55	5-15	50-70	5-20	6-20
Pb	03-09	12-15	15-24	18-25	05-10	03-10
V	200-250	30-100	40-90	100-130	10-60	10-45
Zn	80-120	40-100	40-60	80-120	15-30	10-25

Des études réalisées sur les complexes volcano-sédimentaires et les roches volcaniques à travers le monde, indiquent que les sols qui en résultent sont enrichis en éléments traces métalliques (Strieder *et al.*, 2000 ; Bennoua *et al.*, 2004. Soubrand-Colin, 2004 ; Many et Maboko, 2008 ; Brandt *et al.*, 2009 ; Guo *et al.*, 2009 ; Raza *et al.*, 2009 ; Diez Montes *et al.*, 2010, Mendoza-Rosales *et al.*, 2010).

L'atmosphère est un élément clé dans la dispersion des ETM, par leur retombée sur le continent. Les retombées atmosphériques constituent donc une source diffuse de pollution, dont l'origine peut être éloignée du lieu de dépôt.

Les principales sources naturelles d'ETM dans l'atmosphère sont les poussières terrigènes, les volcans, les aérosols marins, et les feux de forêt (Nriagu, 1989). Les éruptions volcaniques libèrent, en moyenne, par an, et dans le monde, entre 18800 et 27000 t de Cu, entre 3200 et 4200 t de Pb, et 100 t de Hg, dans l'atmosphère (Bliefert et Peraud, 2001). Les retombées atmosphériques peuvent enrichir les sols sous forme de dépôts secs ou lors d'événement pluvieux.

Outre des sources naturelles, les sources d'émission d'ETM dans l'atmosphère sont aussi anthropiques.

2-2-2 Sources anthropiques

Les principales sources de pollution anthropique des métaux sont les activités industrielles, minières et agricoles, mais aussi les quantités croissantes de déchets domestiques (Tableau IV). Nous mettons essentiellement l'accent sur les intrants agricoles, car les zones étudiées sont le lieu d'intenses activités agricoles.

Les substances apportées au sol dans le cadre de l'activité agricole contiennent toutes des ETM, mais en quantités variables. Les sources des ETM dans les sols agricoles sont donc, essentiellement, constituées des boues des stations d'épuration, des pesticides et des fertilisants (Amini *et al.*, 2005 ; Yang *et al.*, 2009 ; Wei et Yang, 2010).

Les concentrations les plus faibles en ETM sont généralement observées pour les intrants obtenus par synthèse chimique. En effet, les fertilisants inorganiques de synthèse (azotés) contiennent, généralement, peu d'ETM, alors que les fertilisants inorganiques provenant de minerais (phosphatés et potassiques) renferment des ETM dont la quantité est souvent importante, et varie en fonction du gisement dont ils sont extraits. Les amendements et fertilisants organiques (fumier, compost, lisier) sont particulièrement riches en Cu et Zn, car ils sont ajoutés à l'alimentation du bétail. Les produits phytosanitaires contiennent, généralement, peu d'ETM, car ils sont produits par synthèse chimique, à l'exception des sulfates et hydrates de Cu, du mancozèbe, utilisant Cu et Zn comme élément actif. Les amendements calcaires contiennent peu d'ETM, bien qu'ils soient généralement tirés de gisements naturels. Ils peuvent cependant modifier le comportement des ETM dans les sols en augmentant le pH (Bur, 2008).

Les apports en ETM réalisés dans les sols agricoles, en lien avec des activités humaines, doivent être contrôlés, du fait des effets néfastes qu'ils peuvent potentiellement engendrer.

Tableau IV : Sources d'éléments traces métalliques dans l'environnement (Ross, 1994).

	Sources	ETM
Mines et fonderies de métaux	Terrils et résidus (contamination par lixiviation et érosion éolienne)	As, Cd, Hg, Pb
	Résidus dispersés par les eaux (contamination des sols suite aux crues, inondations)	As, Cd, Hg, Pb
	Transport des minerais	As, Cd, Hg, Pb
	Fonderies (contaminations dues aux poussières et aérosols)	As, Cd, Hg, Pb, Sb, Se
	Industrie du fer et de l'acier	Cu, Ni, Pb
	Traitement des métaux	Zn, Cu, Ni, Cr, Cd
Industries	Plastiques	Co, Cr, Cd, Hg
	Textiles	Zn, Al, Ti, Sn
	Microélectroniques	Cu, Ni, Cd, Zn, Sb
	Traitement du bois	Cu, Cr, As
	Raffineries	Pb, Ni, Cr
Retombées atmosphériques	Sources urbaines/industrielles, dont incinérateurs et élimination des déchets	Cd, Cu, Pb, Sn, Hg, V
	Industries pyrométallurgiques	As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Tl, Zn
	Gaz d'échappements automobiles	Mo, Pb (avec Br et Cl), V
	Combustion des carburants fossiles (dont les centrales énergétiques)	As, Pb, Sb, Se, U, V, Zn, Cd
Agriculture	Engrais	ex: As, Cd, Mn, U, V et Zn dans certains engrais phosphatés
	Lisiers	ex: As et Cu dans des lisiers de porcs et de volailles, Mn et Zn dans certains lisiers de ferme
	Chaulage	As, Pb
	Pesticides	Cu, Mn et Zn, As et Pb
	Eaux d'irrigation	Cd, Pb, Se

2-3 Facteurs de la mobilité des éléments traces métalliques

Les différents ETM présentent des affinités variables pour les particules solides, et, par opposition, pour la solution du sol. La propension d'un cation métallique pour la phase aqueuse est traduite par son caractère labile, qui va, généralement, avec une mobilité importante au sein du profil de sol et une toxicité élevée (Baize, 1997). Cependant, les conditions physico-chimiques du sol peuvent accroître, ou réduire la labilité des ETM. La mobilité jouant un rôle majeur dans le comportement et les transferts des métaux dans les sols, il est essentiel de connaître les paramètres pouvant l'influencer.

2-3-1 Acidité

Le pH des sols est l'un des paramètres déterminant du comportement des éléments chimiques, dans la mobilité des ETM, notamment dans leur mise en solution et leur mobilité à travers le solum. Une diminution du pH de la solution du sol s'accompagne d'une compétition des protons dans la solution avec les cations métalliques adsorbés sur le complexe argilo-humique, et, provoquent leur libération dans la phase aqueuse (Sposito, 1989 ; Swift et McLaren, 1991).

Les formes chimiques en solution sont déterminées par les conditions du milieu et par la nature de l'élément métallique. Buffle (1981) a mis en évidence et modélisé l'influence du pH sur la modification de la mobilité des métaux dans les sols.

2-3-2 Etat d'oxydo-réduction

Les conditions d'oxydo-réduction (Eh) déterminent le comportement des éléments chimiques à plusieurs valences (Fe, Mn, Cr, S, N). Elles mesurent l'aptitude d'un milieu à fournir les électrons à un agent oxydant ou à retirer des électrons à un agent réducteur. Il existe trois voies par lesquelles les conditions d'oxydo-réduction peuvent influencer la mobilité des éléments métalliques (Bourrelier et Berthelin, 1998) :

- un changement du degré d'oxydation de l'élément métallique ;

- un changement d'état d'oxydation des éléments se liant avec l'élément métallique pour former un complexe soluble ;
- la formation ou la dissolution de phases porteuses de l'élément métallique.

L'état d'oxydo-réduction des sols varie souvent avec les conditions d'hydromorphie, notamment, dans les zones de battement de nappes. Ainsi, outre l'influence directe du potentiel d'oxydo-réduction du milieu sur l'état d'oxydation des éléments métalliques, et donc sur leur mobilité, ce facteur intervient également sur les composants du sol qui fixent les métaux, principalement, les oxydes de fer et de manganèse (Stumm et Sulzberger, 1992). Lorsque le sol est oxydé, les composés ferriques et manganiques sont très peu solubles et immobilisent les ETM. A l'inverse, en conditions réductrices, lors d'inondations ou de battements de nappes par exemple, les éléments fer et manganèse sont réduits et solubilisés, et libèrent ainsi les éléments métalliques (Davranche et Bollinger, 2000).

2-3-3 Oxydes et hydroxydes

Les oxydes et les hydroxydes constituent des solides ioniques, car les éléments chimiques qui les constituent sont à l'état ionique. La configuration électronique de ces éléments chimiques est indépendante de la nature des ions voisins et de celle du minéral (Sposito, 1989). La nature et le nombre de charges électriques portées par les surfaces de ces minéraux dépendent d'une part, des caractéristiques propres aux minéraux, et, d'autre part, des conditions physico-chimiques à l'interface solide/liquide. Les charges électriques inhérentes au minéral sont dues à la substitutions isomorphiques dans le réseau cristallin. Ces substitutions entraînent, dans le réseau, un déficit de charges électriques positives, qui sont équilibrées par des charges électriques négatives portées par les surfaces. Les charges dépendant des caractéristiques physico-chimiques du milieu proviennent de l'ionisation des groupes OH des surfaces (charge protonique). Le nombre de fonctions ionisées varie, principalement, avec la force ionique et le pH de la solution. Ces groupes OH se trouvent sur les surfaces des oxydes et des hydroxydes, et sur les extrémités des feuillets des minéraux argileux. Les ETM, chargés positivement, sous forme ionique, ou complexés, vont pouvoir être fixés à la surface des phases hydroxylées (Bur, 2008).

Les oxydes de fer sont capables de fixer de nombreux éléments traces. Sparks (1995) a recensé les séquences de sélectivité des cations métalliques divalents pour différentes formes de fer : le cuivre, le zinc et le plomb sont parmi les éléments qui ont la plus grande affinité pour le fer ; et, cela, quelle que soit la forme de fer considérée. En ce qui concerne les hydroxydes de fer, certains éléments tels que Ni, Cu, Zn et Mo, ont la capacité de se substituer à Fe dans le réseau cristallin lors de sa formation, par un phénomène de co-précipitation (Sparks, 1995 ; Gavalda, 2001).

2-3-4 Matière organique et complexe argilo-humique

L'adsorption des ions métalliques à la surface des complexes argilo-humiques est réalisée par le biais d'interactions électrostatiques. La stabilité de ces liaisons dépend de la charge électrique et de la taille de l'ion concerné (McBride, 1991). Les macromolécules organiques présentent, généralement, une forte affinité pour les ETM, du fait de leurs charges négatives en surface. Les complexes organométalliques modifient les propriétés des ETM, notamment, en ce qui concerne le transport et la biodisponibilité. Ainsi, la mobilité d'un ETM peut considérablement augmenter dans le cas où il est associé à une molécule organique, ce qui peut conduire à un lessivage important du sol (Aubert *et al.*, 2001), ou à une modification de sa toxicité.

2-3-5 Carbonates

Les carbonates sont représentés dans les sols de façon variable. Leur présence dépend de la nature du matériau parental : les plus riches en CaCO_3 étant principalement d'origine sédimentaire. Leur dissolution est rapide, et la présence de carbonates actifs (ou réactifs) maintient le pH du sol à une valeur élevée, provoquant (pour une majorité d'éléments) un accroissement de la complexation des ETM sur les phases particulières. Ils jouent un rôle important dans les sols, car leurs équilibres de dissolution contrôlent partiellement le pH. Les différents horizons de sol en sont plus ou moins enrichis, du fait de la dissolution du CO_2 atmosphérique, de la minéralisation du carbone organique (CO_2 issu du métabolisme racinaire et de l'activité des micro-organismes) et de la nature de la roche mère. La surface des carbonates peut être le

siège de phénomènes de sorption des ions métalliques par précipitation, absorption et adsorption (Bur, 2008). A l'état natif, les carbonates peuvent contenir des quantités variables d'ETM, en fonction de leur origine, mais Cd, Sb, Cu et Ni sont souvent associés aux fractions carbonatées. Il est fréquent que des carbonates précipitent dans les sols sous forme d'horizons d'accumulation, de pseudomycélium ou de concrétions (Legros, 2007), entraînant la coprécipitation d'ETM associés.

2-3-6 Solution du sol

La solution du sol joue un rôle fondamental dans la distribution des ETM, car la plupart des réactions en jeu dans les processus pédologiques se produisent en phase aqueuse. De plus, la part des ETM présents dans la solution du sol est considérée comme la plus facilement biodisponible, et doit donc être quantifiée et suivie (Bur, 2008).

En solution, les éléments traces métalliques sont présents sous formes de cations, d'hydroxydes ou d'oxyanions, selon leur rayon ionique, leur charge et leur électronégativité. Les ions se trouvant en solution aqueuse sont toujours entourés par des molécules d'eau, le plus fréquemment, entre 4 et 6 molécules, en ce qui concerne les cations. L'intensité de liaison entre l'ion métallique et les molécules d'eau dépend à la fois de la charge et du rayon de l'ion (Pedro et Delmas, 1970).

2-4 Eléments traces métalliques étudiés

2-4-1 Chrome

La concentration moyenne en Cr dans les sols est de 50 mg.kg^{-1} (Pichard *et al.*, 2005). Cette concentration varie selon le type de sol. Une fois dans l'environnement, la spéciation de Cr peut changer sous l'effet de paramètres, tels que la présence de la matière organique, d'oxydes métalliques, le potentiel rédox et le pH. Le chrome existe sous plusieurs degrés d'oxydation, principalement, Cr III et un peu Cr VI. Le chrome VI est transformé en Cr III dans les sols (Pichard *et al.*, 2005). Le chrome est un élément non essentiel et toxique pour les plantes (Zayed et Terry, 2003; Shanker *et al.*,

2005). Cette phytotoxicité peut être à l'origine de dommages au niveau des racines, d'une diminution de la croissance ou d'une chlorose des parties supérieures.

2-4-2 Nickel

Le nickel représente 80 à 90 mg.kg⁻¹ de la croûte terrestre. Il est présent à de fortes concentrations dans les roches-mères ferromagnésiennes, où il se substitue, partiellement, à Fe et à Mg. Il peut être adsorbé par la matière organique ou la matière minérale (oxydes d'aluminium, de manganèse, de fer et argiles). Cette adsorption dépend du pH (Baize, 1997). A faible concentration (0,01 à 5 mg.kg⁻¹ de MS), Ni est considéré comme un élément essentiel pour les végétaux. En effet, il intervient dans la structure de l'uréase, responsable de l'hydrolyse de l'urée au niveau des feuilles (Seregin et Kozhevnikova, 2006). A forte concentration, il devient toxique : soit plus de 10 mg.kg⁻¹ pour les plantes sensibles, et plus de 50 mg.kg⁻¹ pour les plantes tolérantes (Gerendas *et al.*, 1999). Cette phytotoxicité est à l'origine d'une chlorose, d'une diminution de la croissance et d'un désordre dans le métabolisme. Rooney *et al.* (2007) ont aussi montré que l'ajout de Ni sur des sols, inhibe la croissance des feuilles de la tomate.

2-4-3 Cobalt

Le cobalt est un métal de transition, de couleur blanc-argenté, présentant deux états d'oxydation (II et III). Il est utilisé dans les alliages, les aimants, les médias d'enregistrement, et comme catalyseur dans l'industrie chimique et pétrolière. C'est un élément essentiel, entrant, par exemple, dans la composition de la vitamine B12, mais présentant un caractère toxique dû à ses propriétés chimiques (Van der Perk, 2006). Dans les sols, sa présence est principalement gouvernée par l'abondance d'oxydes de Mn et Fe, et sa disponibilité augmente avec une acidité croissante (Baize, 1997).

2-4-4 Cuivre

Le cuivre est l'un des métaux les plus anciennement connus, car il existe à l'état natif. Cu est principalement utilisé (seul ou sous forme d'alliage) dans la confection de feuilles métalliques, de câbles électriques ou de tuyaux (très largement utilisé pour les conduites d'eau). Les principales voies d'entrée de ce métal sur les sols se font par l'épandage de boues de station d'épuration ou de compost (Baize, 1997). Le cuivre est un oligo-élément, il est plus communément étudié pour les problèmes de carence qu'il peut engendrer chez les végétaux, le bétail et l'homme, que pour sa toxicité. Cependant, Cu peut provoquer une phytotoxicité dans certains cas, comme sur les sols anciennement acides. Il induit alors des chloroses ferriques ainsi qu'une diminution de l'absorption de Fe et P (Tremel-Shaub et Feix, 2005).

2-4-5 Plomb

Le plomb est, dans son état naturel, un métal gris bleuâtre, dense et malléable. Le plomb est un élément non essentiel et est moins biodisponible que les autres métaux (Van der Perk, 2006). Le pH a un rôle important dans le transfert du plomb du sol vers les végétaux. L'adsorption sur les oxydes de Fe et Al est également importante (Tremel-Schaub et Feix, 2005).

2-4-6 Zinc

Le zinc est un métal, moyennement réactif, qui se combine avec l'oxygène de l'air pour former une couche d'oxyde blanc imperméable. On le trouve généralement à l'état d'oxydation II. Les teneurs en Zn dans les sols non contaminés sont généralement les plus élevées de tous les ETM. En contexte contaminé, si la concentration en Zn dépasse 300 mg.kg^{-1} , un effet toxique sur différentes espèces de micro-organismes du sol apparaît, réduisant leur capacité de dégradation des débris végétaux et la fixation de l'azote atmosphérique. Zn peut être épandu sur les sols agricoles par le biais des boues urbaines, et un enrichissement notable peut être observé dans les fumiers et lisiers d'animaux d'élevage, principalement pour les

bovins et porcins, dont l'alimentation peut être enrichie en Zn (comme le Cu) (Baize, 1997 ; Tremel-Schaub et Feix, 2005).

2-4-7 Cadmium

Le cadmium est naturellement présent dans la croûte terrestre, à une concentration moyenne de $0,2 \text{ mg.kg}^{-1}$, les plus faibles teneurs en Cd sont trouvées dans les sols issus des roches éruptives (moins de $0,1 \text{ mg.kg}^{-1}$). Les sols issus des roches métamorphiques ont des concentrations comprises entre $0,1$ et 1 mg.kg^{-1} , alors que ceux dérivés des roches sédimentaires montrent les concentrations les plus élevées (jusqu'à 11 mg.kg^{-1}) (Baize, 1997). Dans les sols, Cd est moins fortement adsorbé que les autres métaux divalents, et il est, de ce fait, plus mobile et plus facilement biodisponible. La phytodisponibilité du Cd est majoritairement gouvernée par le pH, les milieux acides augmentant sa mobilité. Le cadmium est un élément non essentiel, et présente une toxicité élevée. Les apports anthropiques de Cd vers les sols sont importants par rapport aux autres éléments traces, en lien avec les activités industrielles (essentiellement par voie atmosphérique), les engrais phosphatés et l'épandage de déchets (Baize, 1997).

2-4-8 Manganèse

Le manganèse est un métal gris blanchâtre, cassant qui existe sous huit états d'oxydation qui représente environ $0,1 \%$ de la croûte terrestre (Baize, 1997). Dans le sol, le manganèse est un micronutriment essentiel pour la plante. Néanmoins, lorsqu'il est présent à de fortes concentrations, Mn peut causer une phytotoxicité. Dans des conditions réduites, Mn (III) et Mn(IV) dans les oxydes est transformé en Mn (II), qui est soluble, mobile et surtout biodisponible (Hue *et al.*, 1999).

2-4-9 Fer

En effet, que ce soit sous forme réduite, oxydée ou complexée par des molécules organiques, le fer participe à d'innombrables processus aussi bien biologiques, physico-chimiques que géologiques. Il est présent dans plus de 600 minéraux, sous forme d'oxydes, d'oxyhydroxydes, de silicates, de sulfates, de phosphates et de carbonates. Le fer est présent dans de nombreux réservoirs, comme les océans, les fleuves, les eaux du sol mais également dans la biomasse. Le fer participe à un vaste cycle géochimique qui met en relation l'ensemble de ces réservoirs (Doelsch, 2010).



**DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET
METHODES**

CHAPITRE III : MATERIEL

3-1 Matériel de prospection

L'acquisition des échantillons de sols et de roches a nécessité :

- un GPS (*Global Positioning System*) de marque GARMIN Oregon 450, une machette et des jalons, pour l'ouverture des différents layons ;
- des pelles bêches et des pioches, pour le creusement des fosses pédologiques ;
- un marteau de géologue, pour casser les roches et rafraichir les faces de profils de sol à décrire ;
- un couteau de pédologue, pour délimiter les horizons, par la méthode au son lorsque la couleur d'ensemble ne le permettait pas ;
- un mètre ruban, pour mesurer les épaisseurs de chaque horizon ;
- un code Munsell, pour déterminer la couleur des horizons de sol ;
- des fiches de description, à renseigner selon les caractéristiques des horizons ;
- des sacs en polystyrène et des étiquettes pour le conditionnement des différents échantillons.

3-2 Matériel de laboratoire

Un tamis à maille carré ($\varnothing = 2 \text{ mm}$) a été utilisé pour séparer la terre fine des éléments grossiers. Ensuite, une balance, de marque « Terraillon », a été utilisée pour quantifier le taux d'éléments grossiers. Les échantillons de sol ($\varnothing < 2 \text{ mm}$) ont été traités avec différents matériels en fonction de l'élément à analyser.

Une balance de précision de marque BEL (model LB 9004) a été utilisée pour la pesée des différentes quantités d'échantillons nécessaires pour l'analyse. La verrerie, composée de tubes à essai, de burettes, de fioles jaugées, de béchers, d'éprouvettes, de pipettes, a également servi pour les manipulations.

3-2-1 Granulométrie

La détermination de la granulométrie des échantillons de sols a été faite à l'aide de la pipette « Robinson ». D'autres accessoires ont été utilisés pour cette détermination, à savoir :

- des allonges type "ORSTOM", pour contenir les échantillons ;
- un récipient, pour vidange du trop-plein ;
- une canne de verre raccordée à une trompe à eau, pour siphonner les argiles et les limons ;
- un agitateur rotatif, pour agiter les allonges ;
- un bac à ultrasons, pour la dispersion de l'échantillon ;
- une étuve à 105 °C, pour sécher les différentes fractions granulométriques ;
- une tamiseuse FRITSCH, pour séparer les sables fins des sables grossiers.

L'utilisation de ces outils fait intervenir des réactifs appropriés pour la détermination de la granulométrie. Il s'agit, entre autre de l'eau oxygénée H_2O_2 (6 %), d'une solution d'ammoniaque au 1/2, d'une solution d'hexamétaphosphate de sodium à 25 g.l^{-1} et d'une solution de carbonate de sodium à 20 g.l^{-1} .

3-2-2 pH

Le matériel qui a servi à la détermination des pH (pH_{H_2O} et pH_{KCl}) se compose de :

- deux pH-mètres, avec électrodes combinées ;
- un agitateur magnétique.

Deux réactifs ont été utilisés : l'eau distillée, pour la détermination du pH_{H_2O} , et le chlorure de potassium, pour le pH_{KCl} .

3-2-3 Carbone organique et azote total

La détermination du carbone organique a été possible grâce à une plaque isolante, un dossimat, une électrode de référence (fil de tungstène). Des réactifs comprenant une solution de bichromate de potassium, une solution de sel de Mohr, un catalyseur (dyphénylamine), ont servi à cette détermination.

Le dosage de l'azote total a été réalisé grâce à une rampe de minéralisation, un distillateur à entraînement de vapeur, des ballons de Kjeldahl ou matras 300 ml, de petits entonnoirs et un agitateur magnétique. Des réactifs composés d'une solution de chlorure d'ammonium $0,04 \text{ mol}^{-1}$, d'acide sulfurique $0,025 \text{ mol}^{-1}$, d'une solution de

soude 12 N, d'une solution d'acide borique à 40 g.l⁻¹, d'une solution de carbonate de sodium 0,025 mol⁻¹, d'un catalyseur de minéralisation (comprimé Kjeldahl) et un mélange sulfosalicylique ont été utilisés pour le dosage.

3-2-4 Phosphore total et assimilable

Le phosphore total du sol a été déterminé à l'aide d'une plaque chauffante, d'une hotte, d'un colorimètre et de papiers filtres Whatmann. Une solution mixte d'extraction d'acide nitrique concentré et d'acide perchlorique, de l'acide sulfurique 1N, un mélange sulfomolybdique et de l'acide ascorbique ont servi au dosage.

Le phosphore assimilable a été déterminé en utilisant un pH-mètre combiné à une électrode de verre, un agitateur va et vient, un autoanalyseur et un colorimètre. Les réactifs utilisés étaient composés d'une solution d'extraction (solution demie molaire de fluorure d'ammonium et d'hydrogencarbonate tamponnée à pH 8,5), d'une solution de soude 5 mol⁻¹, de l'acide sulfurique 1/2, d'une solution d'acide borique à 5 %, de l'ammonium heptamolybdate, du potassium associé à l'antimoine oxytartrate, d'une solution sulfomolybdique et d'une solution d'acide ascorbique.

3-2-5 Capacité d'échange cationique (CEC) et bases échangeables

Le dosage de la CEC et des bases échangeables a nécessité une centrifugeuse, une table agitatrice, un agitateur magnétique, un distillateur par entrainement à la vapeur, un spectrophotomètre d'absorption atomique, du papier filtre Wathmann, et des réactifs comprenant de l'acétate d'ammonium tamponné à pH 7, une solution d'acétate de sodium et de l'alcool éthylique (éthanol).

3-2-6 Eléments traces métalliques

Les ETM ont été analysés à l'aide d'un Spectrophotomètre d'Emission Optique, Couplé à Plasma Inductif (ICP-OES), d'une hotte, d'un bain marie et de tubes téflon,

et en utilisant de l'acide nitrique, de l'acide chlorhydrique, de l'acide fluorhydrique et de l'acide borique comme réactifs.

3-3 Données de télédétection

Des images satellitales orthorectifiées du capteur ETM+ (Enhanced Thematic Mapper plus) du satellite Landsat 7 ont été utilisées pour cette étude. Il s'agit des scènes 197-054 du 16 décembre 2000, 195-054 du 02 février 2000, 196-055 du 26 janvier 2001 et 196-056 du 13 avril 2000, respectivement, pour les zones de Korhogo, Bondoukou, Attiégouakro et Guitry. Toutes les images ont été téléchargées à partir du site internet du « Global Land Cover Facility » : <http://glcfapp.glc.f.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>.

3-4 Matériel de traitement numérique

Pour le traitement des données recueillies, un ordinateur et des logiciels de bureautique, Word et Excel, ont été utilisés. Les logiciels XLSTAT Pro 7.5 et STATISTICA 7.1 ont servi au traitement statistique. Le logiciel Envi 4.3 a été utilisé pour le traitement des images satellitales. La mise en forme cartographique a été réalisée sous Arcview 3.2.

CHAPITRE IV : METHODES

4-1 Choix des sites d'étude

Le choix des différentes zones d'étude a été essentiellement basé sur les critères lithologiques et pédoclimatiques. En effet, à partir de la carte géologique de la Côte d'Ivoire, nous avons procédé à l'inventaire des zones à occurrence de manganèse, puis, en fonction des différentes facettes climatiques, quatre (4) zones ont été sélectionnées (Korhogo, Bondoukou, Attiéougouakro et Guitry). Les différents sites (Dassoublé à Korhogo, Kanguélé à Bondoukou, Tokoré-Yaokro à Attiéougouakro et Lauzoua à Guitry) ont été choisis de façon aléatoire. Tous les sites sont développés sur matériau volcano-sédimentaire.

4-2 Prospection pédologique et échantillonnage du sol

Une prospection pédologique détaillée, réalisée selon la méthode de Boulet *et al.* (1982), a permis de caractériser les différents types de sol des zones d'étude. L'objectif est d'analyser l'organisation spatiale, aussi bien verticale que latérale, du sol, depuis la ligne de partage des eaux jusqu'au talweg adjacent. Ainsi, 3 segments topographiques ont été identifiés, à savoir : le haut de versant (HV), le moyen versant (MV) et le bas de versant (BV) (figure 5).

Sur chaque site d'étude, une toposéquence représentative de la zone à été sélectionnée de manière aléatoire, soit au total 4 toposéquences pour l'étude. L'implantation des diverses toposéquences a été faite suivant 4 layons perpendiculaires aux courbes de niveaux. Suite à ces prospections, 3 profils de référence, appartenant à chaque zone d'étude, soit, un profil par segment topographique (Haut de versant, Moyen versant et bas de versant) ont été échantillonnés par horizon caractéristique (3 à 6 horizons par profil).

Les fosses pédologiques ont été ouvertes à une profondeur maximale de 1,2 m, en l'absence d'induration ou de nappe perchée, et ont été réalisées, exclusivement, sous végétation naturelle (*i.e.* 1m x 0,8m x 1,2m).

Chaque horizon constitutif du solum a été décrit avec soin, en tenant compte des caractères d'hétérogénéité (couleur, structure...). Un exemple de fiche de description

est joint en annexe 1. La couleur a été déterminée à l'œil nu, par référence au code Munsell. Pour trouver la couleur d'un horizon, la couleur d'un échantillon de sol a été comparée à celle d'une planche du code Munsell, et nous avons retenu la couleur la plus rapprochée. La forme des agrégats de l'échantillon (structure) de l'horizon a été déterminée en observant les faces à l'œil nu.

Au total, 56 horizons ont été décrits et ont fait l'objet de prélèvement pour des analyses en laboratoire. Environ 1 kg d'échantillon de sol a été prélevé dans chaque horizon, incluant la terre fine ($\varnothing < 2\text{mm}$), les graviers ($\varnothing < 20\text{ cm}$) et excluant les pierres ($\varnothing > 20\text{cm}$). Les prélèvements ont été effectués depuis les horizons de profondeur vers les horizons de surface, pour éviter d'éventuelles contaminations.

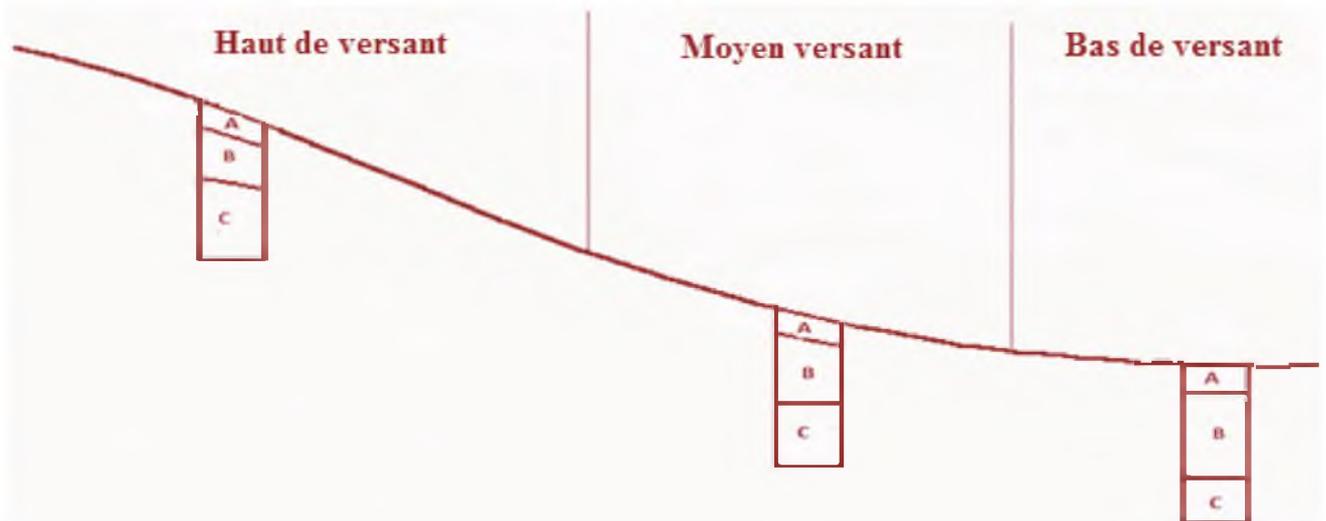


Figure 5 : Schéma de positionnement des fosses pédologiques par segment topographique.

4-3 Codification des horizons

Les horizons, de différentes épaisseurs, identifiés dans les profils de sol, ont été codifiés en créant des classes de profondeur selon le profil racinaire des cultures. Le besoin de codification a été d'autant plus nécessaire que les profils ont eu des épaisseurs variables. Les codifications ont été réalisées conformément aux travaux de Koné (2007), ont permis de distinguer les classes suivantes :

- H₁ (0-20), regroupant tous les horizons compris entre 0 et 20 cm de profondeur, riches en matière organique, parcourus de nombreuses racines ;

- H₂ (20-60), regroupant tous les horizons compris entre 20 et 60 cm de profondeur, avec un appauvrissement progressif en matière organique, on y trouve de nombreuses petites racines ; c'est la profondeur d'exploitation du système racinaire de nombreuses cultures vivrières ;
- H₃ (60-80), correspondant aux horizons compris entre 60 et 80 cm de profondeur, c'est la profondeur minimale recommandée pour la mécanisation agricole ;
- H₄ (80-120), rassemblant tous les horizons compris entre 80 et 120 cm, cette classe caractérise les sols profonds.

4-4 Préparation des échantillons pour analyse

Les échantillons ont été échantillonnés à la main, puis, séchés dans une salle à la température ambiante.

Après séchage, chaque échantillon a été tamisé, à l'aide d'un tamis à maille carrée ($\varnothing = 2$ mm). Les matériaux d'un diamètre inférieur à 2 mm représentent la « terre fine », tandis que les matériaux de taille supérieure à 2 mm de diamètre représentent les éléments grossiers. La terre fine et les éléments grossiers ont été ensuite étiquetés et stockés séparément.

4-5 Caractérisation physique et chimique des sols

Les paramètres agronomiques des sols ont été analysés au laboratoire des Sols de l'ESA (Ecole Supérieure d'Agronomie) de l'INP-HB, à Yamoussoukro. Les teneurs totales en ETM ont été déterminées au CIAPOL (Centre Ivoirien Anti-Pollution) d'Abidjan, et au laboratoire Interrelation Sol-Plantes et Qualité des Aliments de l'Institut National de Recherche et Développement pour la Pédologie, l'Agronomie et la Protection de l'Environnement de Bucarest (Roumanie).

4-5-1 Teneur en éléments grossiers

Avant de déterminer les classes de particules $\emptyset < 2$ mm, la teneur en éléments grossiers est calculée après pesée, au moment du tamisage de l'échantillon, en comparant la masse du refus sur tamis par rapport à la masse initiale de l'échantillon séché à l'air. La formule de calcul est donnée par l'équation 1.

$$\text{EG (\%)} = \frac{\text{masse du refus sur tamis de 2 mm de diamètre}}{\text{masse initiale de l'échantillon séché à l'air libre}} \times 100 \quad (\text{équation 1})$$

4-5-2 Détermination des fractions fines du sol

Les fractions fines ont été déterminées par la méthode densimétrique, à l'aide de la pipette de Robinson (Gee et Bauder, 1986). Vingt grammes d'échantillon de sol ont été utilisés pour déterminer les proportions des 5 classes de particules suivantes :

- argiles ($\emptyset < 2 \mu\text{m}$) ;
- limons fins ($2 \mu\text{m}$ à $20 \mu\text{m}$) ;
- limons grossiers ($20 \mu\text{m}$ à $50 \mu\text{m}$) ;
- sables fins (50 - $200 \mu\text{m}$) ;
- sables grossiers (200 - $2000 \mu\text{m}$).

L'échantillon a été prétraité avec le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2 , 6 %) pour éliminer la matière organique, puis rincé à l'eau déminéralisée, séché à l'étuve à 105°C , refroidi dans un dessiccateur, et pesé.

Les sables ont été séparés des particules plus fines par plusieurs lavages, avec une solution de carbonate de sodium. Ensuite ils ont été séchés et fractionnés par tamisage en sables fins et grossiers. Après avoir séparé les sables grossiers par tamisage, les particules fines ont été ensuite rassemblées dans une éprouvette d'un litre, la dispersion a été réalisée par un court passage aux ultrasons, après addition d'un dispersant alcalin, l'hexametaphosphate de sodium $(\text{NaPO}_3)_6$ 2 % et un ajustement du pH à une valeur se situant entre 8,5 et 9 a été réalisé avec le carbonate de sodium (Na_2CO_3).

Après agitation, les particules ont sédimentées en fonction de leur taille et de la température ambiante, selon la loi de Stokes. 25 ml ont été prélevés à l'aide d'une pipette, à 10 cm de la surface, après 46 secondes, 4 minutes 48 secondes, et 8 heures, correspondant, respectivement, aux particules de 50 μ g (limons grossiers), 20 μ g (limons fins) et 2 μ g (argile). Chaque prélèvement a été recueilli dans un pèse-matière, évaporé à 90°C, porté pendant 1 h à l'étuve à 105°C, puis pesé. Les résultats ont été exprimés en proportion par rapport à la phase $\emptyset < 2$ mm totale (somme des 5 fractions égale à 100 %).

4-5-3 pH du sol

Le pH_{H₂O} a été mesuré après mise en contact de l'échantillon avec de l'eau déminéralisée. Quant au pH_{KCl}, il a été mesuré après mise en contact de l'échantillon avec une solution de 1 M de chlorure de potassium (KCl). Pour ce travail, le pH a été mesuré dans un ratio sol : solution de 1/2,5, à l'aide d'une électrode de verre (McLean, 1982 ; Thomas, 1996). 2,5 g de sol ont été nécessaires pour les mesures de pH.

4-5-4 Carbone et matières organiques

Le carbone a été déterminé par la méthode de Walkley et Black (1934). Il s'agit d'une extraction à froid, au bichromate de potassium, en milieu sulfurique.

Le taux de matière organique a été calculé en multipliant la teneur en carbone par un coefficient stable, fixé conventionnellement à 1,72 par (Baize, 2000).

4-5-5 Azote totale

L'azote a été dosé par la méthode de Kjeldhal (Bremner, 1996). Il s'agit d'une minéralisation en présence d'un catalyseur. Un gramme de sol a été mis en contact avec de l'acide sulfurique (10 ml). Pour la minéralisation, une spatule du catalyseur d'azote (comprimé de Kjeldahl) a été ajoutée au mélange. Le tout a été mis sur la rampe pendant 2h30mn à 3h. Après refroidissement, le substrat a été filtré et complété à 100 ml, avec de l'eau distillée dans un erlenmeyer. Le dosage a été ensuite effectué par colorimétrie automatique (bleu d'indophénol).

4-5-6 Phosphore du sol

Le phosphore assimilable a été déterminé selon la méthode d'Olsen modifiée par Dabin (Olsen et Sommers, 1982). L'extraction des formes de phosphore solubles a été faite grâce à la formation d'acide carbonique, par dissolution de bicarbonate de sodium ; les anions orthophosphates réagissent avec le molybdate d'ammonium, en milieu acide, pour donner de l'acide phosphomolybdique, qui est réduit par l'acide ascorbique en bleu de molybdène.

Le phosphore total a été dosé par colométrie automatique du phosphomolybdate, réduit par l'acide ascorbique, après attaque de l'échantillon à l'acide nitrique concentré.

4-5-7 Capacité d'échange cationique et cations échangeables

A pH 7, la capacité d'échange cationique (CEC) et les bases échangeables ont été déterminées par extraction à l'acétate d'ammonium (NH_4Ac , pH 7) (Van Reeuwijk, 2002).

Pour la détermination de la CEC, 2,5 g de sol ont été d'abord saturés en ions ammonium (NH_4^+) par percolations successives d'une solution d'acétate d'ammonium ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{NH}_4$) à 1 mol/L. Après avoir éliminé l'excès d'ions ammonium par percolations d'alcool éthylique, leur échange par une solution de chlorure de sodium à 1 mol/L a été réalisé. Les ions ammonium déplacés sont dosés par spectrophotométrie sur la solution précédente, une fois filtrée.

Les cations K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} de 5 g de sol ont été extraits avec 25 ml d'acétate de sodium NaOAc 1 N à pH 7. Après 10 min d'agitation, le mélange a été centrifugé pendant 5 min, à 2000 t/min, et le surnageant a été transvasé dans une fiole jaugée de 100 ml. L'opération a été répétée quatre fois, pour aboutir à un volume final d'environ 100 ml.

Pour le dosage de Na^+ , l'excès d'acétate de sodium a été éliminé par quatre lavages, avec 25 ml d'éthanol. Le culot a été repris par 25 ml d'acétate d'ammonium NH_4OAc , agité pendant 10 min, centrifugé pendant 5 min, à 2000 t/min, et le filtrat a

été versé dans une fiole jaugée de 100 ml. Cette opération a été répétée quatre fois pour aboutir à un volume final d'environ 100 ml.

Ces cations ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique.

4-5-8 Détermination des éléments traces métalliques

La détermination de la teneur en ETM a nécessité une mise en solution du sol. Les échantillons ont été désagrégés par minéralisation à voie humide, avec des acides forts (HNO₃ (69 %), HCl (37 %) et HF (48 %)).

Les échantillons de sol ont été tamisés à l'aide d'un tamis de maille 68 µm, placé sur un support vibrant. Une prise de 0,3 g de sols, passée à travers le tamis, a été nécessaire pour les analyses des ETM. La prise a été placée dans des bombes en téflon de 30 ml. A cette prise a été ajouté 1ml d'eau régale (9 ml HNO₃ (69 %) et 3 ml HCl (37 %)), puis 6 ml d'acide fluorhydrique (48 %). Le tout a été mis sous une hotte pendant 1h. Ensuite, les tubes en téflon, bien fermés, ont été bien agités, chauffés dans un bain marie réglé à 250°C, pendant 2h30mn, puis refroidis à la température ambiante. Après refroidissement, les minéralisats contenus ont été versés dans des tubes en polypropylène de 50 ml, contenant 2,7 g d'acide borique et 20 ml d'eau distillée. Le tout a été ensuite amené à un volume final de 50ml avec de l'eau distillée, selon le protocole décrit par Loring et Rantala (1990).

Les éléments traces ont été déterminés à l'aide d'un Spectrophotomètre d'Emission Optique, Couplé à Plasma Inductif (ICP-OES).

4-6 Facteurs d'enrichissement en ETM

Le facteur d'enrichissement (FE) est un indicateur qui renseigne sur le taux d'enrichissement d'un échantillon en un élément par rapport à un matériel de référence. Le matériau de référence a été l'horizon le plus profond du profil de sol conformément aux travaux de Sterckeman *et al.* (2006), Panichayapichet *et al.* (2007). L'élément normalisant ou élément de référence qui a été utilisé dans cette étude pour le calcul du facteur d'enrichissement a été Fe, du fait de son affinité pour les ETM et son abondance relative (Lu *et al.*, 2005 ; Sterckeman *et al.*, 2006 ; Panichayapichet *et*

al., 2007 ; Yay *et al.*, 2008, Hissler et Probst, 2006 ; Schulin *et al.*, 2007 ; N'Guessan *et al.*, 2009).

Le calcul du facteur d'enrichissement est donné par l'équation 2, après choix de l'élément normalisant (Fe) et du matériau de référence (horizon profond).

$$FE = \frac{\left(\frac{[ETM]}{[Fe]}\right)_{\text{horizon considéré}}}{\left(\frac{[ETM]}{[Fe]}\right)_{\text{Horizon profond}}} \quad (\text{équation 2})$$

4-7 Analyses statistiques

Les données obtenues ont été transcrites dans des tableaux, sous Excel. Les logiciels tels que XLSTAT Pro 7.5 et STATISTICA 7.0 ont été utilisés pour les traitements des données.

Le test de khi-deux (χ^2) a été utilisé pour le traitement des caractères morphologiques des sols. Ce test a permis d'établir l'associativité ou non entre la toposéquence et les paramètres qualitatifs que sont, la couleur, la texture et la structure, d'une part et entre le site d'étude et les paramètres qualitatifs tels que, la couleur, la texture et la structure, d'autre part.

L'analyse de la variance (ANOVA), utilisant le test de la plus petite différence significative (ppds ou Lsd) et celui de Tukey ont été adoptées pour la structuration des différentes moyennes obtenues entre les horizons des segments topographiques, et entre les horizons des profils types des zones d'étude.

Les corrélations linéaires et les modèles de régression ont été utilisés pour établir les relations quantitatives entre les paramètres pédologiques et les éléments traces métalliques dans le sol. La robustesse du modèle de régression est jugée par la valeur du coefficient de détermination ajustée du modèle (R^2_{aj}), et par l'analyse de la variance du modèle (à l'aide de la probabilité associée au test de Fisher, $Pr > F$). L'analyse de la variance du modèle permet d'évaluer le pouvoir explicatif des variables explicatives. Plus la probabilité (associé au test de Fisher) est faible, plus le pouvoir explicatif du modèle est important. En premier lieu, c'est le paramètre le plus

important. Le seuil de signification a été fixé à $\alpha = 0,05$, ce qui indique que le modèle existe pour une probabilité associée au test de Fisher, inférieure à 0,05.

L'analyse factorielle, qui est une technique permettant de réduire la somme des variables de départ à un plus petit nombre de variables indépendantes ou facteurs, capables de restituer l'information contenue dans les variables originales, a été utilisée pour mettre en évidence les processus majeurs qui gouvernent les sols. Parmi les méthodes d'analyses multivariées, l'analyse factorielle en composantes principales (AFCP) a été utilisée, parce qu'elle permet de mettre en évidence les corrélations linéaires entre les variables d'un jeu de données.

Des graphes et des histogrammes ont été tracés pour apprécier l'évolution et la distribution des certains éléments.

4-8 Cartographie des sols

Les sites étudiés ont été extraits des scènes 197-054 du 16 décembre 2000, 195-054 du 02 février 2000, 196-055 du 26 janvier 2001 et 196-056 du 13 avril 2000, respectivement, pour les zones de Korhogo, Bondoukou, d'Attiégouakro et Guitry. Les canaux utilisés sont le vert (ETM+2), le rouge (ETM+3) et le proche infra rouge (ETM+4). Toutes les bandes utilisées ont une résolution spatiale de 30 m.

4-8-1 Amélioration du contraste

L'amélioration du contraste des canaux utilisés a été réalisée par étalement dynamique. Cela consiste en la modification de l'histogramme de réflectance de l'image, en vue d'augmenter le contraste. C'est l'étalement linéaire simple qui a été appliqué pour ce travail.

4-8-2 Calcul d'indices spectraux

Après plusieurs visites d'observations et de reconnaissances sur le terrain, la méthode utilisée a consisté, comme dans de nombreuses études (Abderrazak, 2003 ; Banari *et al.*, 2007 ; Bahri *et al.*, 2012) à calculer des indicateurs radiométriques à

partir d'images satellitaires (ETM+ de Landsat 7) pour reconnaître et cartographier les sols manganésifères.

Les indicateurs radiométriques retenus sont : l'indice de végétation normalisée (NDVI), l'indice de couleur (IC) et l'indice de brillance (IB). Le choix de ces indices a été guidé par le fait qu'ils sont les mieux indiqués pour faire ressortir, sur les images, aussi bien les surfaces végétalisées que les surfaces minéralisées. En effet :

- l'indice de végétation normalisée est l'indice le mieux connu et le plus utilisé, pour détecter les phases de développement de la plante verte, à partir des données multispectrales de télédétection (Geerken et Ilaiwi, 2004). Son utilité dans la cartographie des sols a été montrée par de certains auteurs (Mathieu *et al.*, 2012). Le NDVI est calculé selon l'équation 3 :

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R})$$

(équation 3)

- l'indice de brillance des sols (IB) est le plus répandu des indices utilisés en sciences du sol (Tourino, 2005). Son utilisation a déjà montré de bons résultats dans la cartographie des sols dans plusieurs études (Carré, 2002 ; Tourino, 2005). La formule de calcul de cet indice est donnée par l'équation 4 :

$$\text{IB} = (\text{R}^2 + \text{PIR}^2)^{1/2}$$

(équation 4)

- l'indice de couleur (IC) est en relation avec la couleur du sol, qui est un important critère de caractérisation des sols. La couleur d'un sol résulte de sa composition minéralogique et de sa teneur en matière organique. Ainsi, un sol rouge indique la présence d'oxydes ou d'hydroxydes de fer, et un sol noir indique une teneur élevée en matière organique (Abderrazak, 2003). La formule de calcul de l'indice de couleur est donnée par l'équation 5 :

$$\text{IC} = (\text{R} - \text{V}) / (\text{R} + \text{V})$$

(équation 5)

Pour les équations des indices radiométriques : V correspond au canal du vert (ETM+2) ; R : canal du rouge (ETM+3) et PIR : canal du proche infrarouge Rouge (ETM+4).

4-8-3 Classification des images

Les classifications sont des procédés qui ont pour but d'assigner une classe particulière ou thème à chacun des pixels d'une image. Les méthodes de classifications peuvent être séparées en deux grandes catégories : les méthodes de classification supervisée et les méthodes de classification non supervisée.

Dans cette étude, nous avons adopté la classification supervisée car, comme cette technique l'exige, nous connaissions suffisamment les zones d'études, et, plus particulièrement, les secteurs de références, pour y avoir effectué, au préalable, plusieurs visites de reconnaissance. La classification supervisée a été réalisée sur la base d'une composition colorée, construite à partir des néocanaux que sont l'indice de végétation normalisé (NDVI), l'indice de brillance (IB) et l'indice de couleur (IC). Nous avons appliqué ensuite un filtre spatial (filtre médian 5x5) pour harmoniser les différentes classes des pixels.

L'analyse des classes se base sur les erreurs de commission et d'omission. Les erreurs de commission correspondent aux pixels ayant été mal classifiés par le classificateur. Les erreurs d'omission correspondent aux pixels ayant été omis d'une classe par le classificateur. A partir de ces deux mesures d'erreur, il est possible de déterminer la précision pour l'utilisateur (*User's Accuracy*) et pour le réalisateur (*Producer's Accuracy*) (Story et Congalton, 1986). La précision pour l'utilisateur est le pourcentage de pixels d'une classe de la classification, correctement classés vis-à-vis de la référence (100% - erreurs de commission). La précision pour le réalisateur est le pourcentage de pixels d'une classe de référence, correctement classés par télédétection (100% - erreurs d'omission) (Girard et Girard, 1999).

Une classe est considérée comme étant correctement détectée par la classification lorsque les indices *User's Accuracy* et *Producer's Accuracy* sont supérieurs à 70% (Foody, 2002).

Deux indices issus des matrices de confusion permettent d'évaluer la qualité de la Classification. Il s'agit de la précision totale et l'indice de Kappa, proposé par Congalton *et al.* (1983).

La précision totale (O.A. : *Overall Accuracy*) est le rapport entre le nombre de pixels correctement classés et le nombre total de pixels à classer. Une valeur minimale de la précision totale, communément admise pour valider une classification est de 85% (Foody, 2002).

L'indice de Kappa exprime la réduction proportionnelle de l'erreur obtenue par une classification, comparée à l'erreur obtenue par une classification complètement au hasard (Congalton *et al.*, 1983).

L'algorithme de classification en maximum de vraisemblance est celui que nous avons adopté, parce qu'il nous a permis d'obtenir une structure spatiale correcte.

La dernière étape a consisté à vérifier les données de terrain avec celles de la carte par des missions de terrains.

Cinq classes ont été retenues lors la classification :

- Cambisols (Manganiferric, Dystric) ;
- Cambisols (Dystric) ;
- Endogleyic Cambisols (Dystric) ;
- Cuirasses et/ou affleurements rocheux ;
- Plinthic Cambisols (Dystric).



**TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET
DISCUSSION**

CHAPITRE V : RESULTATS

5-1 Caractéristiques morphologiques des sols

5-1-1 Evolution des caractères physiques du sol à l'échelle du versant

5-1-1-1 Couleur

La distribution fréquentielle des teintes (2,5YR ; 5YR ; 7,5YR et 10YR) observées dans les sols, pour les différents segments topographiques, le long de la toposéquence, est présentée à la figure 6. Chaque niveau de versant est caractérisé par la fréquence élevée d'une teinte donnée. Ainsi, le haut versant (HV) et le moyen versant (MV) sont caractérisés par des teintes plus rouges (2,5YR). Par contre, au bas versant (BV), on observe la prédominance de teintes jaunâtres (7,5YR).

La valeur du χ^2 (0,013) obtenue est supérieure à la valeur critique, correspondant au seuil de significativité statistique de 0,05. Ce résultat nous permet de dire qu'il existe bien une relation associative entre la teinte du sol et les segments topographiques.

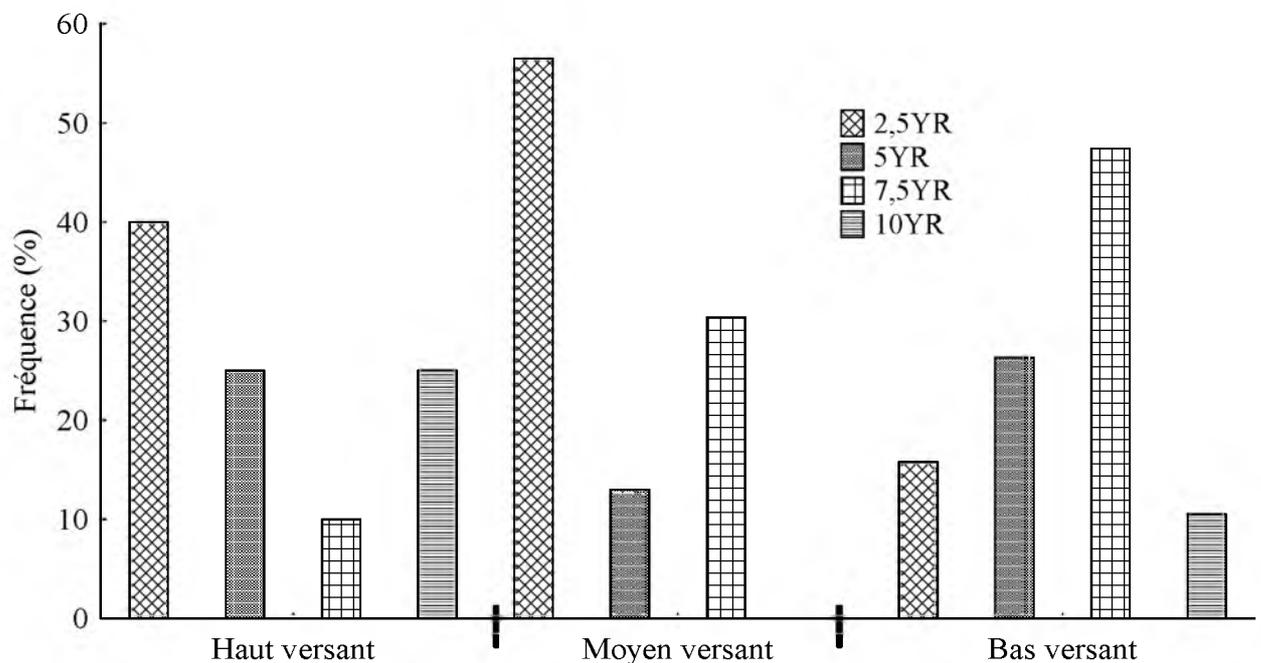


Figure 6 : Distribution fréquentielle de la teinte du sol selon les segments topographiques ($\chi^2=0,013$) dans les 4 sites.

Dans le tableau V, le chroma 4 est le plus fréquent, à l'exception de la teinte 10YR, dont le chroma est souvent de 3. Nous avons remarqué que les teintes et les chroma sont associés significativement ($\chi^2 = 0,005$). Quant à la valeur (clarté de la teinte), les valeurs les plus fréquemment identifiées sont de 2 pour les teintes 5YR et 10YR, 3 pour la teinte 7,5YR, et 4 pour la teinte 2,5YR. L'association entre teinte et valeur n'est pas significativement marquée ($\chi^2 > 0,05$).

5-1-1-2 Structure du sol

La structure dominante des sols est polyédrique subangulaire, quel que soit le segment topographique (Figure 7). Il a été observé que la structure du sol est liée significativement ($\chi^2 = 0,022$) aux segments topographiques. En effet, si au bas de versant (BV) la structure massive est observée, la structure grumeleuse apparaît mieux au haut de versant.

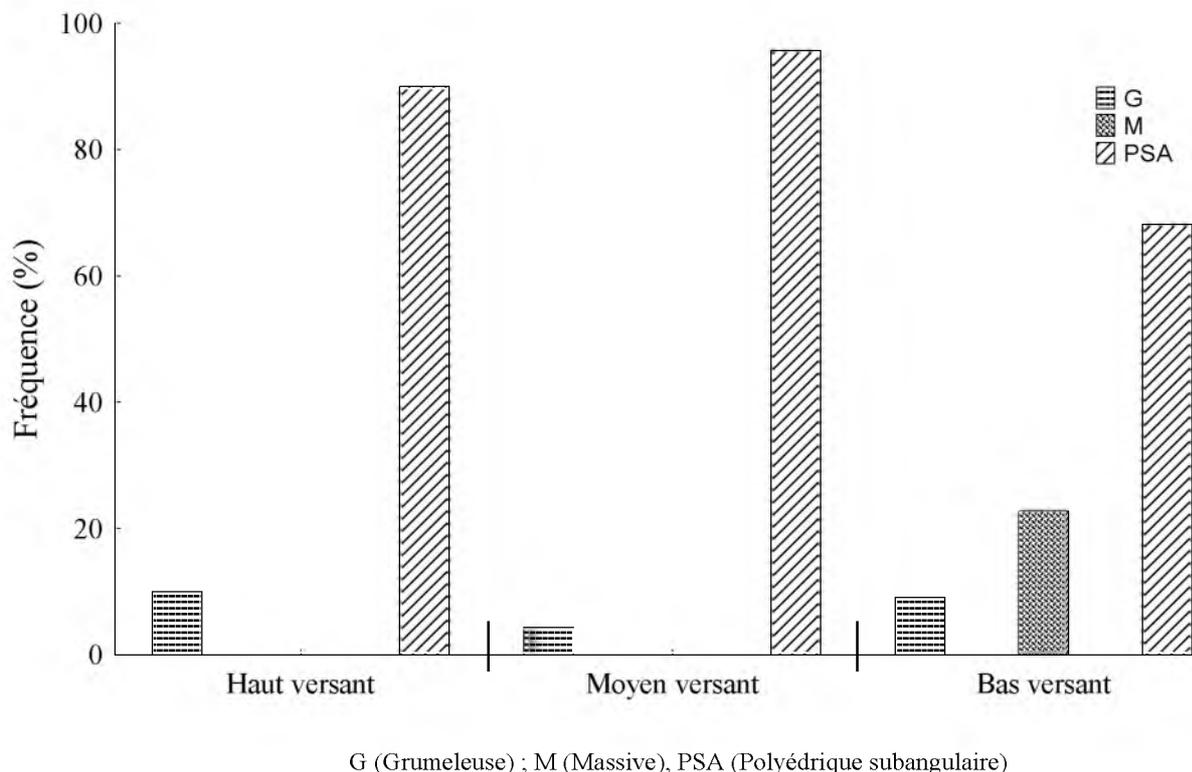


Figure 7 : Fréquence des structures pour les différents niveaux topographiques dans les 4 sites ($\chi^2 = 0,022$).

Tableau V : Fréquences (%) des valeurs de chroma et de value des 4 sites.

Hue	Chroma						Value						
	2	2,5	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	8
2,5YR	0	8,34	16,66	50	8,34	16,66	4,17	16,67	20,83	37,5	4,17	8,33	8,33
5YR	0	0	38,46	61,54	0	0	7,7	38,46	30,77	23,07	0	0	0
7,5YR	0	11,12	22,22	50	16,66	0	0	22,22	38,9	27,77	0	11,11	
10YR	14,3	0	85,7	0	0	0	14,3	42,8	14,3	28,6	0	0	0
Dl	15						18						
χ^2	0,005						0,726						

Dl : degré de liberté ; χ^2 a été calculé pour l'ensemble des chromas d'une part, et des values d'autre part.

5-1-1-3 Eléments grossiers

Il a été observé un appauvrissement en éléments grossiers, du haut de versant vers le bas de versant. La tendance générale est à une diminution du taux d'éléments grossiers, d'une part, suivant la profondeur et, d'autre part, selon la toposéquence, du haut vers le bas. Néanmoins, une légère accumulation a été observée dans l'horizon H₄, en haut de versant (tableau VI).

Tableau VI : Variation des teneurs (% pondéral) en éléments grossiers, suivant la profondeur du sol, et les segments topographiques des 4 sites.

Horizon	Toposéquence		
	Haut versant	Moyen versant	Bas versant
H ₁	65,29	60,02	44,99
H ₂	55,19	59,41	47,74
H ₃	38,18	53,12	47,36
H ₄	59,05	45,06	32,55

5-1-1-4 Effet de la topographie sur la répartition des particules granulométriques

Le tableau VII montre la variation des teneurs moyennes en argile du sol en fonction de la profondeur, pour les différents niveaux topographiques. Les teneurs sont croissantes de H₁ à H₄ au haut de versant. Au moyen versant et au bas versant, il y a une augmentation des teneurs de H₁ à H₃ puis, une baisse des valeurs pour H₄. L'horizon H₃ se comporte donc comme une zone d'accumulation d'argile ; c'est un horizon textural. Le tableau VII montre également une différence significative entre les valeurs de H₁ selon les niveaux topographiques. La valeur H₁ du bas versant est différente de celles du moyen versant et du haut versant, au seuil α égal à 0,05 %.

Les teneurs moyennes en sables et les déviations standards (SD) en fonction de la profondeur et du niveau topographique sont présentées au tableau VIII. Les valeurs sont décroissantes de H₁ à H₄, pour le haut versant.

Tableau VII : Variation de la teneur en argile (g.kg^{-1}) selon la profondeur et la topographique des 4 sites.

Horizons	Toposéquence			Paramètres statistiques	
	Haut Versant M \pm SD	Moyen Versant M \pm SD	Bas Versant M \pm SD	p	F
H ₁	142,9 \pm 69 a	259,5 \pm 63 a	249,8 \pm 89 b	0,036	4,018
H ₂	307,7 \pm 145 a	370,9 \pm 37 a	335,0 \pm 123 a	0,731	0,321
H ₃	427,5 \pm 185 a	440,0 \pm 115 a	383,2 \pm 67 a	0,837	0,180
H ₄	486,9 \pm 142 a	332,6 \pm 98 a	303,9 \pm 99 a	0,133	2,48

M \pm SD : Moyenne \pm Ecart type (Déviation Standard) ; Les moyennes suivies d'une même lettre sur la même ligne (comparaisons entre les niveaux de versant pour chaque horizon) ne diffèrent pas au test de Tukey à $\alpha=0,05$

Les plus fortes teneurs de sable sont observées dans les horizons H₁ et H₂ du haut versant. Aux moyen versant et bas versant, les teneurs en sable décroissent de H₁ à H₃, puis, il y a une accumulation en H₄. La dynamique du sable dans ces sols est donc contraire à celle de l'argile. Les différences, au seuil α égal à 0,05 %, sont observées ici dans l'horizon H₁. Seul le haut de versant est différent du moyen versant et du bas versant. Les observations faites dans les profils de sol du moyen versant et du bas versant indiquent une répartition diffuse de l'argile et du sable.

Tableau VIII : Variation de la teneur en sable (g.kg^{-1}) selon la profondeur et le segment topographique des 4 sites.

Horizons	Toposéquence			Paramètres statistiques	
	Haut de Versant M \pm SD	Moyen Versant M \pm SD	Bas Versant M \pm SD	p	F
H ₁	487,5 \pm 14,2 a	305,5 \pm 11,9 b	311,3 \pm 133 b	0,05	3,411
H ₂	459,9 \pm 17,3 a	268,7 \pm 65 a	345,4 \pm 207 a	0,279	1,406
H ₃	277,7 \pm 47 a	212,0 \pm 10,1 a	206,8 \pm 65 a	0,555	0,627
H ₄	227,6 \pm 39 a	261,3 \pm 12,9 a	307,8 \pm 84 a	0,523	0,690

M \pm SD : Moyenne \pm Ecart type (Déviation Standard) ; Les moyennes suivies d'une même lettre sur la même ligne (comparaisons entre les niveaux de versant pour chaque horizon) ne diffèrent pas au test de Tukey à $\alpha=0,05$

Le tableau IX montre les teneurs moyennes en limon et les déviations standards (SD) dans les sols de différents niveaux topographiques. Les valeurs de limon du moyen versant sont décroissantes de H₁ à H₃, puis, il y a une accumulation en H₄. Concernant le haut versant et le bas versant, les valeurs évoluent en zigzag, de H₁ à H₄.

Tableau IX: Variation de la teneur en limon (g.kg^{-1}) selon la profondeur et le segment topographique des 4 sites.

Horizons	Toposéquence			Paramètres statistiques	
	Haut Versant M \pm SD	Moyen Versant M \pm SD	Bas Versant M \pm SD	p	F
H ₁	369,5 \pm 90 a	434,8 \pm 10,9 a	438,7 \pm 12,2 a	0,511	0,696
H ₂	232,3 \pm 35 a	360,3 \pm 93 a	319,5 \pm 12,2 a	0,173	2,008
H ₃	294,7 \pm 14,2 a	347,9 \pm 12,6 a	409,9 \pm 83 a	0,557	0,624
H ₄	285,4 \pm 12,1 a	405,9 \pm 21,9 a	388,2 \pm 31 a	0,509	0,721

M \pm SD : Moyenne \pm Ecart type (Déviation Standard) ; Les moyennes suivies d'une même lettre sur la même ligne (comparaison entre les niveaux de versant pour chaque horizon) ne diffèrent pas au test de Tukey à $\alpha=0,05$

Le test d'association du χ^2 réalisé sur les différents types de textures et les niveaux topographiques n'a montré aucune significativité ($\chi^2=0,59$) (figure 8). C'est dire que la texture n'est pas associée à la position topographique. Toutefois, chaque segment topographique est caractérisé par une texture dominante. Le bas versant et le moyen versant sont caractérisés, respectivement, par les textures limoneuses et limono-argileuses. Au haut de versant, nous observons en revanche, la dominance de deux textures différentes (argileuse et limoneuse) dans les mêmes proportions.

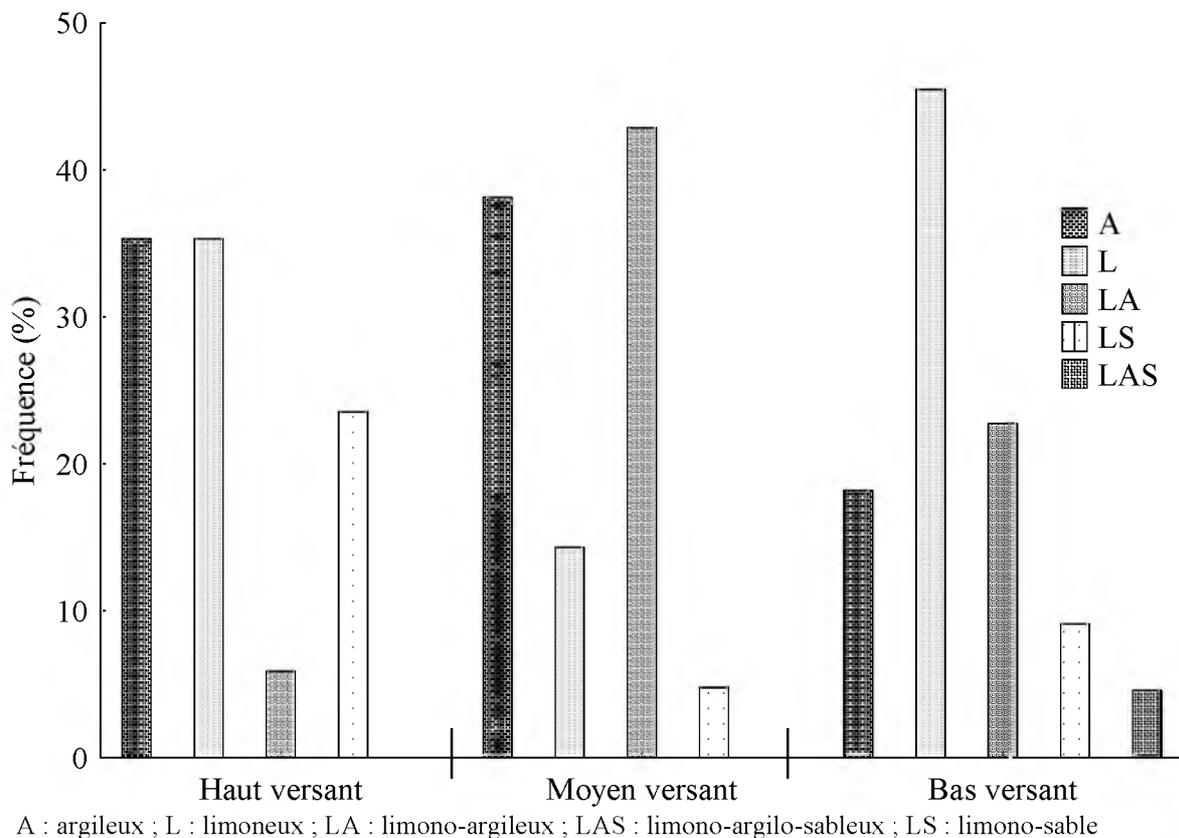


Figure 8 : Distribution fréquentielle de la texture en fonction de la topographie dans les 4 sites ($\chi^2=0,59$).

La figure 9 montre les sols des différents segments topographiques. Nous constatons une abondance d'éléments grossiers dans les sols. Ces sols se caractérisent par la présence de blocs de roches en voie d'altération sur tout le profil au haut de versant. Au moyen versant, les éléments grossiers sont distribués sur tout le profil. Au bas de versant, il y a présence d'eau de manière temporaire ou permanente. Ce qui fait apparaître les gley et les pseudogley avec des taches grises et rouilles.

Haut de versant



Moyen versant



Bas de versant



Figure 9 : Profils de sol le long de la toposéquence.

5-1-2 Caractères morphologiques des sols des différents sites

5-1-2-1 Couleur du sol

La figure 10 montre la répartition fréquentielle des teintes du sol, avec une probabilité $\chi^2=0,004$, attestant d'une association entre la teinte et les zones d'études. Chaque zone est caractérisée par la forte fréquence d'une teinte. Ainsi, les zones de Lauzoua et de Dassoumblé sont caractérisées par des teintes plus jaunes (7,5YR), tandis que Tokoré-Yaokro et Kanguélé sont caractérisés par des teintes rougeâtres (2,5YR).

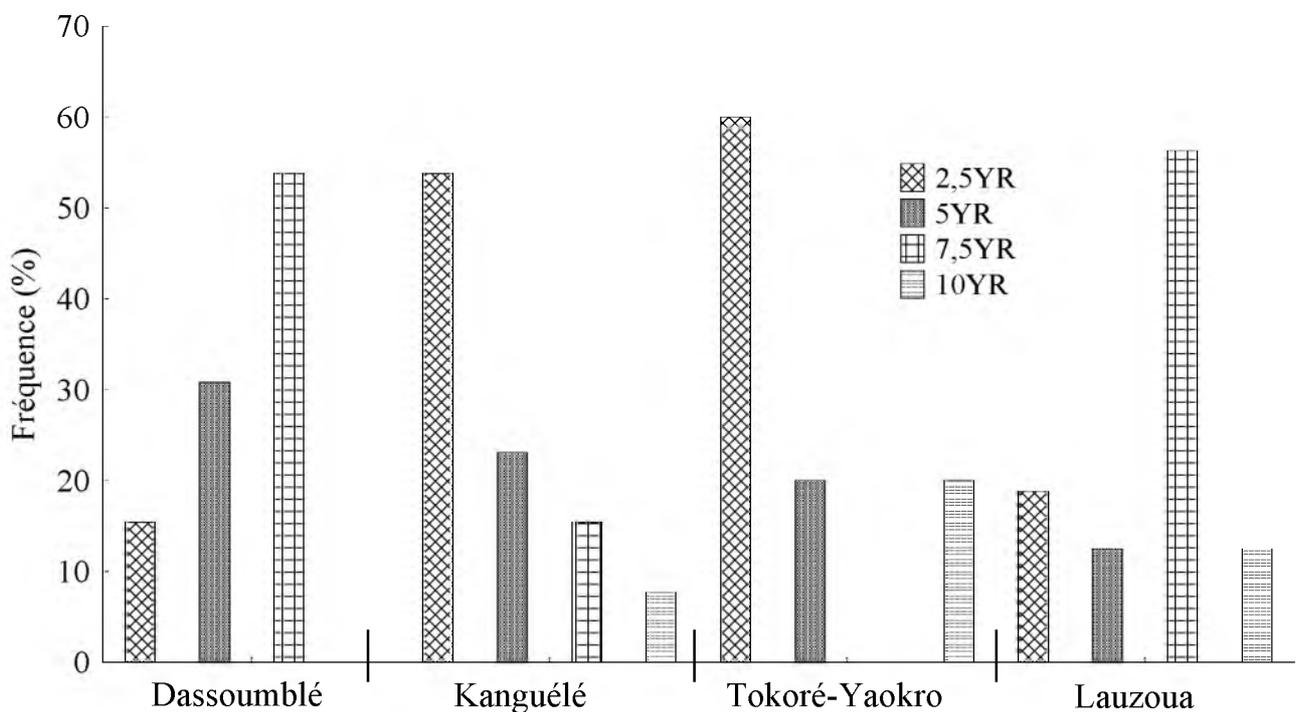


Figure 10 : Distribution fréquentielle de la teinte selon la zone d'étude ($\chi^2 = 0,004$).

5-1-2-2 Structure du sol

La figure 11 montre la distribution de la structure selon le site d'étude. Le test de Khi-deux montre que la structure du sol n'est pas significativement ($\chi^2=0,053$) liée à la zone d'étude. Toutefois, nous pouvons noter que la structure massive est plus exprimée à Kanguélé. L'observation de structure grumeleuse est quasiment identique à Kanguélé et à Lauzoua.

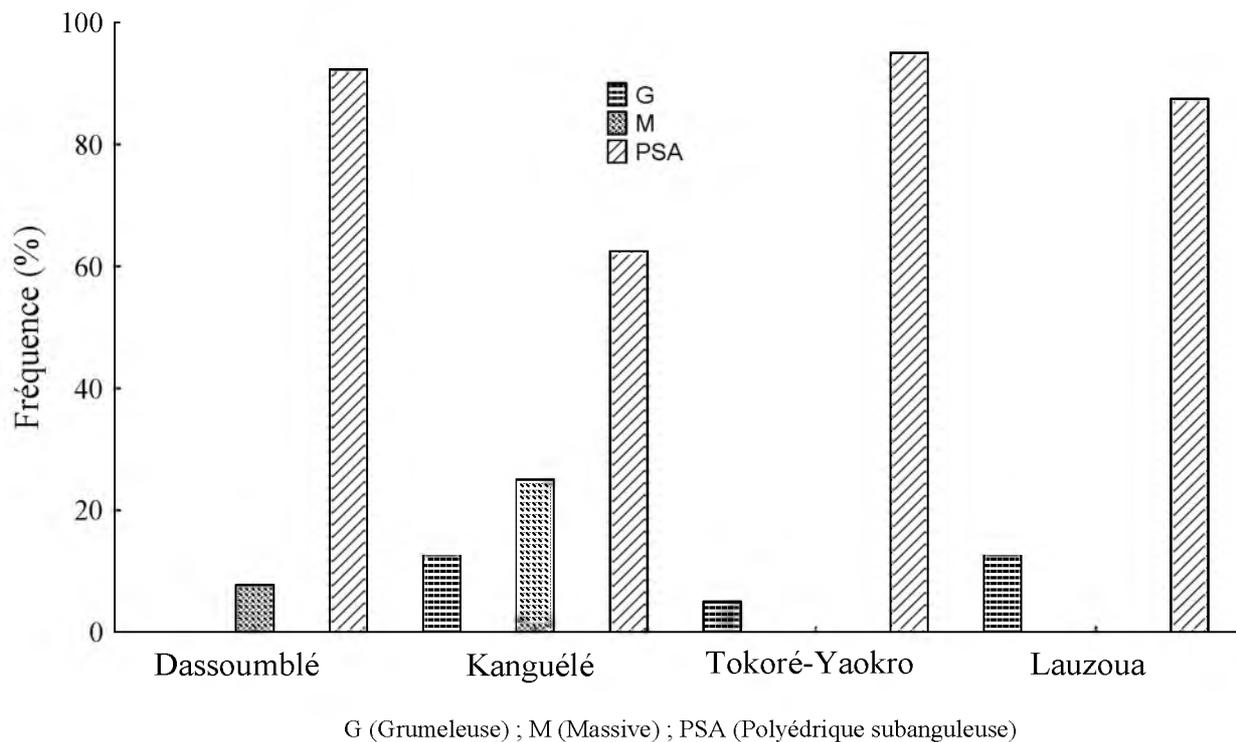


Figure 11 : Distribution Fréquentielle de la structure du sol dans les différentes zones d'études ($\chi^2=0,053$).

5-1-2-3 Eléments grossiers

Les sols étudiés ont été caractérisés par de forts taux d'éléments grossiers (22,27 - 72,87) (tableau X). Les pourcentages pondéraux sont partout supérieurs à 30 %, excepté la zone de Kanguélé (Bondoukou), où il y a eu des teneurs en dessous de cette valeur. Dans les sols de Kanguélé et de Dassoumlé, la tendance est à la diminution du taux d'éléments grossiers avec la profondeur. A Lauzoua et à Tokoré-Yaokro, c'est l'inverse qui est observé, c'est-à-dire un accroissement du taux d'éléments grossiers avec la profondeur.

Tableau X : Teneurs (% pondéral) en éléments grossiers à différentes profondeurs du sol par site d'étude.

	sites			
	Lauzoua	Tokoré-Yaokro	Kanguélé	Dassoumlé
H ₁	58,30	53,91	36,85	72,87
H ₂	67,39	73,61	22,80	61,87
H ₃	59,16	49,21	22,27	58,71
H ₄	58,98	41,08	23,72	53,03

5-1-2-4 Granulométrie des sites d'étude

Les valeurs moyennes des fractions granulométriques sont présentées dans le tableau XI.

Le sable est la fraction granulométrique la plus représentée dans la couche humifère et à pénétration humifère ($H_1+H_2 = 60$ cm) sur les sites de Korhogo et de Bondoukou. Quant aux sites d'Attiégouakro et de Guitry, la couche humifère et à pénétration humifère est beaucoup plus riche en limon. L'argile domine dans les couches de profondeur (H_3 et H_4). Cela est beaucoup plus marqué sur les sites de Korhogo, Bondoukou et Attiégouakro. Sur le site de Guitry, le limon est prédominant de la surface en profondeur. Ainsi, les sites appartenant aux climats soudanien et baouléen (Korhogo, Bondoukou et Attiégouakro) ont un degré d'entraînement des argiles (lessivage) plus important que celui du climat attiéen (Guitry). Seules les valeurs des teneurs en limon et en sables des horizons H_1 et H_2 expriment une différence significative ($>lsd$) au seuil $\alpha=0,05$.

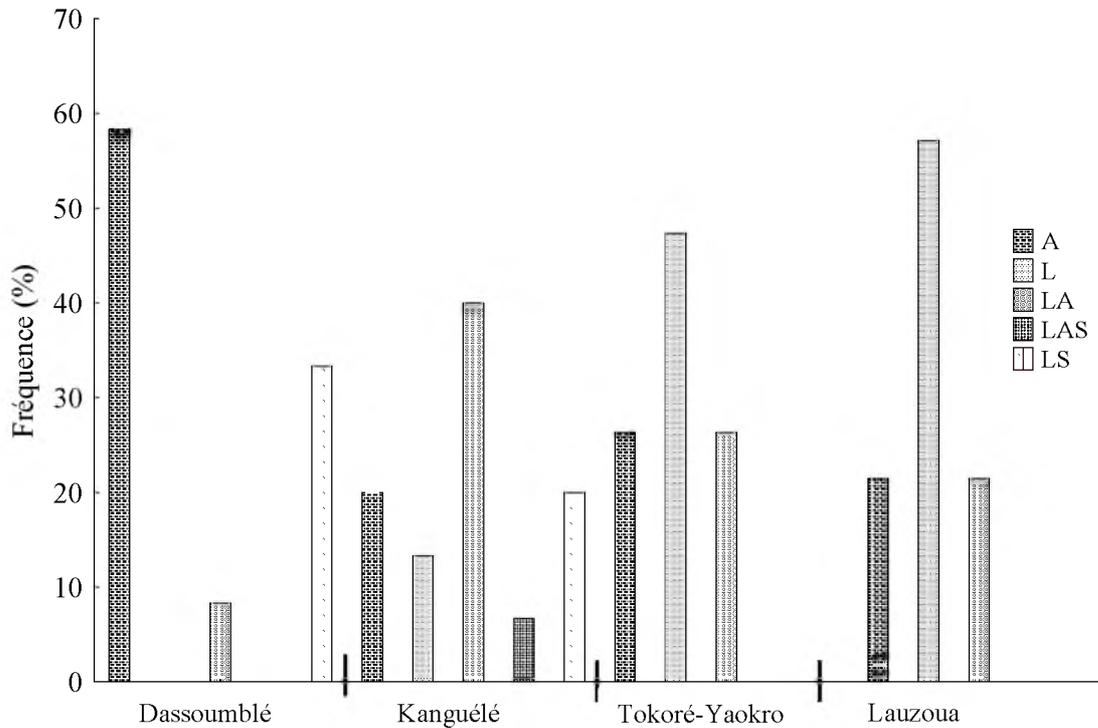
Tableau XI : Valeurs moyennes des fractions granulométriques selon le site d'étude.

	Horizon	Site				LSD _{0,05}
		Dassoumblé	Kanguélé	Tokoré-Yaokro	Lauzoua	
Argile (g.kg ⁻¹)	H ₁	189a	254a	235a	209a	115
	H ₂	382a	260a	381a	336a	162
	H ₃	485a	450a	464a	279a	212
	H ₄	411a	428a	355a	362a	279
Limon (g.kg ⁻¹)	H ₁	296c	321c	437b	541a	81
	H ₂	279bc	204c	356b	481a	92
	H ₃	284a	291a	342a	485a	212
	H ₄	302a	281a	427a	375a	285
Sable (g.kg ⁻¹)	H ₁	515a	425ab	329b	250b	177
	H ₂	339ab	536a	263b	184b	200
	H ₃	231a	259a	193a	236a	173
	H ₄	287a	292a	218a	262a	181

Les moyennes suivies d'une même lettre sur la même ligne ne diffèrent pas au test de la plus petite différence significative de Fisher à $\alpha = 0,05$.

Le test d'associativité du Khi-deux réalisés sur les différents types de texture et les zones d'études a montré un lien d'association entre la texture et la zone d'étude

($\chi^2 = 0,004$). Chaque zone étudiée se caractérise donc par une texture dominante (figure 12). Ainsi, les sols de Dassoumbélé (Korhogo) sont à dominance argileuse (A), alors que ceux de Kanguélé (Bondoukou) sont limono-argileux (LA). Les sites de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro) et de Lauzoua (Guitry) sont caractérisés par une texture limoneuse (L).



A : argileux ; L : limoneux ; LA : limono-argileux ; LAS : limono-argilo-sableux ; LS : limono-sable

Figure 12 : Distribution fréquentielle de la texture selon la zone d'étude ($\chi^2 = 0,004$).

5-2 Caractéristiques chimiques des sols

5-2-1 Caractéristiques des sols manganésifères le long de la toposéquence

5-2-1-1 pH du sol en fonction de la topographie

Les valeurs moyennes du pH des sols sont nettement inférieures à 5,5 pour tous les niveaux topographiques (figure 13). Ce sont donc des sols acides. Le pH_{KCl} mesuré ici a la même évolution que le $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, mais, les valeurs sont inférieures, en tout lieu, à celles du $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$. La différence entre pH_{KCl} et $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ne dépasse pas 0,5 en valeur absolue, quel que soit le niveau topographique et l'horizon considéré (tableau XII).

Le pH a montré une acidité croissante avec la profondeur, pour les haut et moyen versants. Par contre, au niveau du bas versant, l'acidité diminue dans l'horizon de profondeur. Globalement, le haut versant est moins acide que les autres segments topographiques.

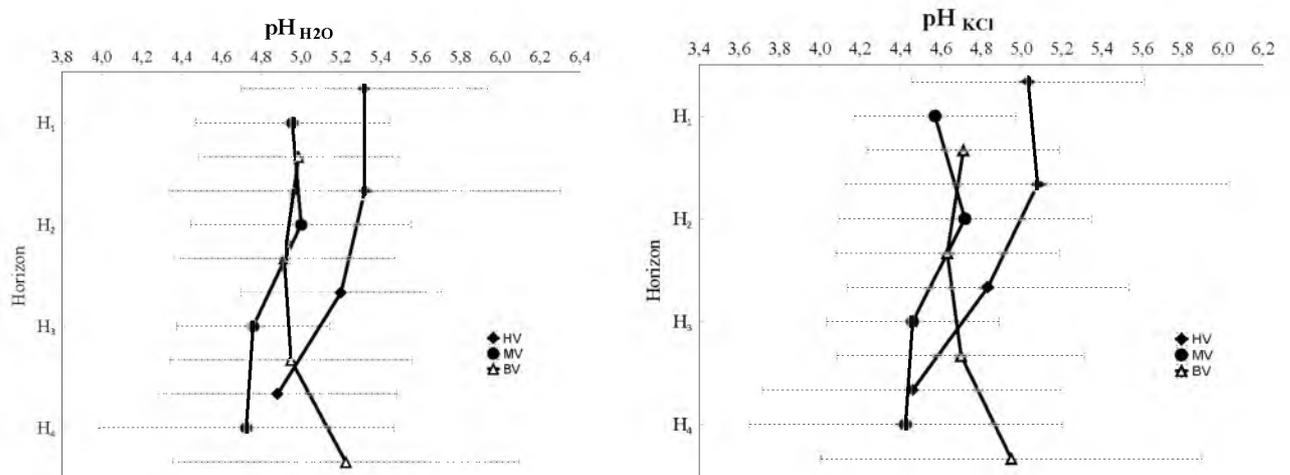


Figure 13 : Variation du pH selon les différents niveaux topographiques et en fonction de la profondeur des sols des 4 sites.

Tableau XII : Acidité résiduelle (ΔpH) dans les horizons de sol selon la toposéquence.

Horizon	ΔpH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} - \text{pH}_{\text{KCl}}$)		
	Haut versant M \pm SD	Moyen versant M \pm SD	Bas versant M \pm SD
H ₁	0,3 \pm 0,1	0,4 \pm 0,2	0,3 \pm 0,1
H ₂	0,2 \pm 0,1	0,3 \pm 0,1	0,3 \pm 0,0
H ₃	0,4 \pm 0,2	0,3 \pm 0,1	0,3 \pm 0,1
H ₄	0,4 \pm 0,2	0,3 \pm 0,1	0,3 \pm 0,1

M \pm SD : Moyenne \pm Ecart type (Déviation Standard)

5-2-1-2 Distribution de la matière organique et du phosphore suivant le gradient topographique des sols riches en manganèse

Les teneurs moyennes en carbone et les déviations standards sont présentées dans le tableau XIII. Les horizons de surface (H₁ (0-20 cm) et H₂ (20-60 cm)) contiennent l'essentiel de la teneur en C des sols, quel que soit le niveau topographique. Toutefois, ces teneurs en C n'excèdent pas 26 g.kg⁻¹. Le tableau XIII révèle une baisse continue de la teneur en C avec la profondeur, quelle que soit la

position topographique. Par ailleurs, l'on a constaté, au niveau du bas de versant, une teneur plus importante ($25,8 \text{ g.kg}^{-1}$), et une distribution plus ou moins homogène du taux de C dans tout le profil. Il est observé une baisse des teneurs de carbone au niveau du moyen versant. Seule les teneurs de l'horizon H₃ (60-80) expriment une différence significative, au seuil $\alpha = 0,05$.

Les valeurs moyennes de l'azote total sont indiquées dans le tableau XIII. Les valeurs moyennes de N décroissent de façon continue avec la profondeur, à tous les niveaux topographiques. Tout comme le C, les horizons H₁ et H₂ ont concentré l'essentiel de N du profil de sol. L'on observe une variation significative au niveau de l'horizon H₄, en fonction de la topographie, au seuil $\alpha = 0,05$.

L'horizon H₂, au niveau du haut de versant, a des valeurs moyennes à grandes déviation standard pour le carbone et l'azote total. Le rapport C/N varie de 7,25 en profondeur, à 13,6 en surface (tableau XIII).

Le tableau XIV montre les valeurs moyennes du phosphore total et du phosphore assimilable. Ce tableau révèle que les valeurs de P total et de P assimilable sont décroissantes, des horizons de surface vers les horizons de profondeur, quel que soit le niveau topographique. Les horizons de surface (H₁ et H₂) sont les plus riches en P. L'on observe une croissance de la teneur en P, du haut versant au bas versant. Cela est mis en évidence dans les horizons H₁ et H₄. L'accumulation du phosphore au bas versant est manifeste dans tout le profil.

Les tableaux XIII et XIV montrent que le carbone, l'azote, le phosphore total et le phosphore assimilable se comportent de la même manière. En effet, les teneurs sont élevées en surface et décroissent progressivement avec la profondeur, mais indépendamment du niveau topographique.

Seul le phosphore assimilable de l'horizon H₄ a présenté une différence significative au seuil $\alpha = 0,05$.

Tableaux XIII : Teneurs moyennes en éléments caractéristiques de la matière organique selon la topographie et la profondeur des 4 sites.

		Toposéquence			Paramètres statistiques	
Horizon		Haut versant	Moyen versant	Bas versant	F	P
		M±SD	M±SD	M±SD		
C (g.kg ⁻¹)	H ₁	22,3 ± 11,5 a	17,4 ± 07,5 a	25,8 ± 14,3 a	0,843	0,447
	H ₂	21,1 ± 2,4 a	13,6 ± 06,8 a	13,1 ± 5,0 a	0,406	0,674
	H ₃	09,0 ± 02,8 ab	04,3 ± 01,8 b	13,1 ± 7,5 a	2,902	0,04
	H ₄	05,8 ± 02,1 a	03,0 ± 01,6 a	10,8 ± 4,0 b	6,487	0,016
N (g.kg ⁻¹)	H ₁	2,0 ± 1,0 a	1,3 ± 0,5 a	2,0 ± 0,9 a	1,249	0,310
	H ₂	1,6 ± 1,0 a	1,0 ± 0,4 a	1,3 ± 0,6 a	0,283	0,758
	H ₃	1,0 ± 0,6 a	0,4 ± 0,1 a	1,3 ± 0,8 a	1,956	0,197
	H ₄	0,8 ± 0,2 a	0,3 ± 0,1 b	0,9 ± 0,2 a	6,448	0,016
C/N	H ₁	11,15 ± 2,94 a	13,36 ± 3,59 a	12,9 ± 2,36 a	0,740	0,491
	H ₂	13,18 ± 1,37 a	13,6 ± 3,4 a	10,07 ± 2,33 a	0,682	0,523
	H ₃	9 ± 2,54 a	10,75 ± 2,67 a	10,07 ± 2,33 a	0,050	0,951
	H ₄	7,25 ± 4,03 a	10 ± 2,73 a	12 ± 1,4 a	1,360	0,300

M±SD : Moyenne ± Ecart type (Déviation Standard) ; Les moyennes suivies d'une même lettre sur la même ligne (comparaisons entre les niveaux de versant pour chaque horizon) ne diffèrent pas au test de Tukey à $\alpha=0,05$.

Tableau XIV : Teneurs moyennes en P total et P ass. selon la topographie et la profondeur des 4 sites.

		Toposéquence			Paramètres statistiques	
Horizon		Haut versant	Moyen versant	Bas versant	F	P
		M±SD	M±SD	M±SD		
Ptotal (mg.kg ⁻¹)	H ₁	489 ± 273,93 a	523,85 ± 174,12 a	527,25 ± 274,19 a	0,041	0,960
	H ₂	404,2 ± 141,62 a	329,6 ± 52,66 a	475,83 ± 243,47 a	0,808	0,467
	H ₃	268,33 ± 75,96 a	214,4 ± 58,5 a	347 ± 131,21 a	1,705	0,236
	H ₄	231,4 ± 75,31 a	274,5 ± 53,15 a	322,5 ± 108,87 a	1,060	0,382
Pass (mg.kg ⁻¹)	H ₁	78,5 ± 34,02 a	77,14 ± 46,84 a	81,62 ± 48,96 a	0,017	0,983
	H ₂	68 ± 23,04 a	60,2 ± 25,12 a	55 ± 20,96 a	0,356	0,707
	H ₃	15,66 ± 4,03 a	39,6 ± 28,9 a	51,25 ± 27,08 a	1,386	0,299
	H ₄	10,6 ± 6,53 a	54 ± 23,63 b	44,25 ± 28,25 ab	4,217	0,047

M±SD : Moyenne ± Ecart type (Déviation Standard) ; Les moyennes suivies d'une même lettre sur la même ligne (comparaisons entre les niveaux de versant pour chaque horizon) ne diffèrent pas au test de Tukey à $\alpha=0,05$.

5-2-1-3 Evolution du complexe adsorbant selon la profondeur et le segment topographique

Les tableaux XV et XVI présentent, respectivement, les teneurs moyennes du sol en cations alcalinoterreux et en cations alcalins, ainsi que les déviations standards à différents niveaux topographiques. Nous observons, dans ces sols, une décroissance de la teneur en Ca^{2+} de H_1 à H_2 , puis, une accumulation en H_3 . Cette tendance est observée au niveau du haut versant et du bas versant. Au niveau du moyen versant, l'accumulation est plutôt observée en H_4 . Il y a une accumulation en Ca^{2+} au bas versant. Les valeurs de Mg^{2+} ont subi une baisse en fonction de la profondeur de H_1 à H_2 , puis, une accumulation en H_3 , pour le bas versant et en H_4 , au niveau du haut versant. Pour le moyen versant, la diminution est marquée de H_1 à H_3 , puis une accumulation en H_4 est observée. Une lixiviation est observée selon le gradient topographique par une augmentation des teneurs en bas de versant.

Concernant les cations alcalins, le tableau XVI indique une baisse de la teneur en K^+ avec la profondeur. Cependant, l'horizon H_4 des sols du haut versant et ceux du bas versant montrent une accumulation de cet élément. La teneur en Na^+ est également décroissante de H_1 à H_3 et, ensuite, une accumulation est observée en H_4 pour le haut versant et le moyen versant.

Tableau XV : Valeurs moyennes des cations alcalinoterreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) en fonction de la profondeur et de la topographie des 4 sites.

		Toposéquence			Paramètres statistiques	
		Haut versant M±SD	Moyen versant M±SD	Bas versant M±SD	F	P
Ca^{2+} (cmol.kg ⁻¹)	H_1	2,01 ± 1,01 a	1,43 ± 0,68 a	2,33 ± 1,52 a	0,981	0,394
	H_2	0,79 ± 0,99 a	0,48 ± 0,55 a	0,92 ± 0,61 a	0,405	0,675
	H_3	1,18 ± 1,36 a	0,49 ± 0,64a	1,26 ± 0,76 a	0,714	0,515
	H_4	1,08 ± 0,72 a	0,78 ± 0,55a	1,06 ± 0,74 a	0,185	0,834
Mg^{2+} (cmol.kg ⁻¹)	H_1	1,46 ± 0,94 a	1,50 ± 0,60 a	1,97 ± 1,28 a	0,507	0,611
	H_2	0,47 ± 0,35 a	0,60 ± 0,52 a	1,51 ± 1,18 a	2,253	0,145
	H_3	0,74 ± 0,55 a	0,59 ± 0,57 a	2,15 ± 1,6 a	2,163	0,171
	H_4	0,80 ± 0,42 a	0,74 ± 0,51 a	1,41 ± 1,24 a	0,681	0,528

M±SD : Moyenne ± Ecart type (Déviation Standard) ; Les moyennes suivies d'une même lettre sur la même ligne (comparaisons entre les niveaux de versant pour chaque horizon) ne diffèrent pas au test de Tukey à $\alpha=0.05$.

Tableau XVI : Valeurs moyennes des teneurs en cation alcalins (K^+ et Na^+) en fonction de la profondeur et de la topographie des 4 sites.

	Horizon	Toposéquence			Paramètres statistiques	
		Haut versant M±SD	Moyen versant M±SD	Bas versant M±SD	F	P
K^+ ($cmol.kg^{-1}$)	H ₁	0,18 ± 0,1 a	0,17 ± 0,16 a	0,16 ± 0,15 a	0,032	0,969
	H ₂	0,05 ± 0,02 a	0,04 ± 0,01 a	0,04 ± 0,01 a	1,255	0,317
	H ₃	0,07 ± 0,06 a	0,03 ± 0,02 a	0,04 ± 0,01a	1,097	0,375
	H ₄	0,15 ± 0,19 a	0,03 ± 0,02 a	0,05 ± 0,04a	0,878	0,445
Na^+ ($cmol.kg^{-1}$)	H ₁	0,29 ± 0,33 a	0,24 ± 0,26 a	0,15 ± 0,19 a	0,387	0,684
	H ₂	0,09 ± 0,09 a	0,08 ± 0,03 a	0,07 ± 0,02 a	0,206	0,817
	H ₃	0,05 ± 0 a	0,06 ± 0,02 a	0,06 ± 0,01 a	0,596	0,571
	H ₄	0,06 ± 0,02 a	0,08 ± 0,03 a	0,06 ± 0,02 a	0,830	0,464

M±SD : Moyenne ± Ecart type (Déviation Standard) ; Les moyennes suivies d'une même lettre sur la même ligne (comparaisons entre les niveaux de versant pour chaque horizon) ne diffèrent pas au test de Tukey à $\alpha=0.05$

L'évolution des valeurs de CEC et du taux de saturation en bases est présentée au tableau XVII. Il est observé une forte désaturation en bases dans les sols, quel que soit le niveau topographique. La CEC est modérée dans les sols, quelle que soit la position topographique, avec des valeurs se situant entre 11,77 et 20,85 $cmol.kg^{-1}$.

Tableau XVII : Valeurs moyennes de la CEC et du taux de saturation en bases selon la profondeur et la topographie des 4 sites.

	Horizon	Toposéquence			Paramètres statistiques	
		Haut versant M±SD	Moyen versant M±SD	Bas versant M±SD	F	P
CEC ($cmol.kg^{-1}$)	H ₁	20,67±8,33a	17±3,68a	17,15±4,04a	0,776	0,475
	H ₂	15,4±2,33a	17,32±5,9a	17,53±4,25a	0,299	0,746
	H ₃	13,2±6,63a	12,1±6,15a	20,85±8,2a	1,430	0,289
	H ₄	11,79±7,44a	11,77±5,35a	14,92±9,47a	0,182	0,836
V (%)	H ₁	33,35±39,61a	20,42±7,25a	31,07±23,26a	0,413	0,668
	H ₂	9,99±9,98a	8,03±7,1a	16,12±14,12a	0,665	0,531
	H ₃	27,03±33,28a	8,19±7,53a	18,78±16,64a	0,667	0,537
	H ₄	41,76±51,31a	12,53±6,7a	42,15±56,91a	0,456	0,646

M±SD : Moyenne ± Ecart type (Déviation Standard) ; Les moyennes suivies d'une même lettre sur la même ligne (comparaisons entre les niveaux de versant pour chaque horizon) ne diffèrent pas au test de Tukey à $\alpha=0,05$.

5-2-2 Caractéristiques des sols dans les sites d'étude

5-2-2-1 pH du sol selon le site d'étude

Les valeurs moyennes de pH sont présentées dans le tableau XVIII. Les pH sont acides et inférieurs à 5,5 quel que soit le site d'étude et la profondeur du sol. Les pH à Kanguélé (Bondoukou) sont proches de 5,5. Les faibles pH sont observés à Dassoumbélé (Korhogo). Les sols sont acides quel que soit le site d'étude.

Tableau XVIII: Acidité du sol en fonction des sites et de la profondeur.

	pHeau			
	Dassoumbélé	Kanguélé	Tokoré-Yaokro	Lauzoua
H ₁	4,6±0,07	5,05±1,57	5,21±0,70	5,23±0,2
H ₂	4,275±0,5	5,5±,34	5,26±0,5	4,85±0,6
H ₃	4,5±0,6	5,43±0,17	4,9±0,4	4,76±0,5
H ₄	5,1±0,6	5,03±0,073	4,96±0,36	4,8±0,8

5-2-2-2 Minéralisation de la matière organique selon les sites d'étude

Le tableau XIX exprime les valeurs moyennes de C et de N selon les sites d'étude. Nous n'avons pas observé de différence significative entre les valeurs de carbone. Par contre, une différenciation significative est manifestée au niveau de l'horizon H₃, pour N, et au niveau des horizons H₂, H₃ et H₄, pour le rapport C/N, au seuil $\alpha = 0,05$. Ce qui montre que les teneurs de ces éléments dans le sol ne diffèrent pas selon les sites d'études, à la profondeur 20 cm. La significativité du rapport C/N est exprimée entre la valeur du site de Lauzoua (Guitry) (climat attiéen) et celles des autres sites (Dassoumbélé (Korhogo) et Kanguélé (Bondoukou), climat soudanien ; Tokoré-Yaokro (Attégouakro), climat baouléen). Les valeurs du rapport C/N dans les horizons humifères et/ou à pénétration humifères sont situées entre 10 et 14.

Au niveau de l'horizon H₁, nous remarquons que les valeurs de C sont décroissantes, de Dassoumbélé (Korhogo) au Nord à Lauzoua (Guitry) au Sud.

Tableau XIX : Teneurs moyennes du sol en carbone organique, en azote total et en rapport C/N en fonction des sites et de la profondeur.

	Horizon	Site				LSD _{0,05}
		Dassoumblé	Kanguélé	Tokoré-Yaokro	Lauzoua	
C (g.kg ⁻¹)	H ₁	29,6a	25,9a	19,7a	17,2a	5,6
	H ₂	29a	13,5a	9,8a	10a	9,7
	H ₃	14,8a	7,2a	4,4a	11a	7,4
	H ₄	11,8a	6a	6,1a	5a	6,5
N (g.kg ⁻¹)	H ₁	2,4a	2a	1,5a	1,6a	1,1
	H ₂	2,2a	1,1a	0,8a	1,2a	1,5
	H ₃	1,2ab	0,4b	0,7ab	1,7a	1,1
	H ₄	0,9a	0,5a	0,5a	0,5a	0,5
C/N	H ₁	12,33a	12,95a	12,68a	10,75a	4
	H ₂	13,18a	12,27a	12,03a	10,41b	2,5
	H ₃	12,33a	12a	6,28a	6,47b	1,5
	H ₄	13,11a	12a	12,2a	10b	4,1

Les moyennes suivies d'une même lettre dans la même colonne ne diffèrent pas au test de la plus petite différence significative de Fisher à $\alpha=0,05$.

5-2-2-3 Teneurs en phosphore total et en phosphore assimilable

Le tableau XX présente les valeurs respectives du phosphore total et du phosphore assimilable des différents sites étudiés, pour les horizons H₁, H₂, H₃ et H₄. Aucune différence significative n'est observée pour le phosphore total. Cela montre que les teneurs en phosphore total de ces sols ne diffèrent pas selon le site étudié, quelle que soit la profondeur. Par contre, au niveau du phosphore assimilable, des différences significatives (>lsd) sont observées dans tous les horizons, au seuil $\alpha=0,05$. Les valeurs en phosphore assimilable des horizons de profondeurs (H₃ et H₄) sont toutes décroissantes, de Dasoumblé (Korhogo) à Lauzoua (Guitry). Les plus faibles teneurs de P assimilable sont observées à Lauzoua (Guitry). Les sols manganésifères ont des teneurs en phosphore assimilable qui excèdent 20 mg.kg⁻¹ en surface.

Tableau XX : Variation des teneurs moyenne du sol en P total et en Pass en fonction des sites et de la profondeur.

Horizon		Site				LSD _{0,05}
		Dassoumblé	Kanguélé	Tokoré-Yaokro	Lauzoua	
P total (mg.kg ⁻¹)	H ₁	457a	301a	601a	595a	318
	H ₂	520a	289a	445a	386a	251
	H ₃	364a	202a	238a	325a	194
	H ₄	340a	260a	333a	216a	144
P ass. (mg.kg ⁻¹)	H ₁	80,75ab	79,25ab	102,85a	50,66b	51,52
	H ₂	62,25a	78,8ab	56,6ab	22,5b	34,34
	H ₃	68a	60a	19,75b	18,33b	40,13
	H ₄	71a	58ab	26bc	10,4c	34,29

Les moyennes suivies d'une même lettre dans la même colonne ne diffèrent pas au test de la plus petite différence significative de Fisher à $\alpha=0,05$.

5-2-2-4 Distribution des teneurs en cations alcalinoterreux et en cations alcalins sur les sites étudiés

Le tableau XXI présente les valeurs moyennes des teneurs en alcalinoterreux (Ca²⁺ et Mg²⁺) des sols des différents sites dans les horizons H₁, H₂, H₃ et H₄.

Les teneurs du sol en Ca²⁺ ne montrent aucune différence significative (<lsd) entre elles, au seuil $\alpha=0,05$ dans l'horizon H₁. Les différences sont observées surtout, entre le site de Guitry et celui d'Attiégouakro, pour les horizons H₂, H₃ et H₄.

Les teneurs du sol en Mg²⁺ ont toutes présenté une différence significative (>lsd), quelle que soit la profondeur du profil.

Le site de Lauzoua (Guitry) est mieux pourvu en alcalinoterreux par rapport aux autres sites étudiés.

Le tableau XXII montre les valeurs moyennes de K⁺ et de Na⁺ dans les différents horizons, selon le site étudié. Les valeurs sont sensiblement identiques dans les horizons de surface, sur tous les sites, pour K⁺. Les différences significatives sont observées au niveau des horizons H₂ et H₃. Quant à la teneur en Na⁺, les plus fortes valeurs sont observées sur le site de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro). Cependant, seuls les sols de l'horizon H₁ ont présenté une différence significative (>Lsd) entre les valeurs moyennes de Na⁺, au seuil $\alpha=0,05$.

Tableau XXI : Teneurs moyennes du sol en Ca^{2+} et en Mg^{2+} en fonction des sites et de la profondeur.

	Horizon	Site				LSD _{0,05}
		Dassoumlé	Kanguélé	Tokoré-Yaokro	Lauzoua	
Ca^{2+} (cmol.kg ⁻¹)	H ₁	1,17a	1,90a	1,76a	2,68a	1,61
	H ₂	0,41ab	1,35a	0,12b	1,46a	0,8
	H ₃	0,51ab	1,27ab	0,05b	2,01a	1,54
	H ₄	0,81ab	1,24a	0,01b	1,49a	0,9
Mg^{2+} (cmol.kg ⁻¹)	H ₁	0,66b	1,78ab	1,75ab	2,20a	1,15
	H ₂	0,60bc	1,20b	0,18c	2,58a	0,88
	H ₃	0,73ab	1,81ab	0,06b	2,21a	1,88
	H ₄	0,60ab	1,79a	0,08b	1,17ab	1,3

Les moyennes suivies d'une même lettre dans la même ligne ne diffèrent pas au test de la plus petite différence significative de Fisher à $\alpha=0,05$.

Tableau XXII : Teneurs moyennes du sol en K^+ et en Na^+ en fonction des sites et de la profondeur.

	Horizon	Site				LSD _{0,05}
		Dassoumlé	Kanguélé	Tokoré-Yaokro	Lauzoua	
K^+ (cmol.kg ⁻¹)	H ₁	0,14a	0,15a	0,15a	0,15a	0,18
	H ₂	0,04b	0,06a	0,04b	0,06ab	0,02
	H ₃	0,03ab	0,05ab	0,01b	0,09a	0,07
	H ₄	0,03a	0,05a	0,01a	0,18a	0,22
Na^+ (cmol.kg ⁻¹)	H ₁	0,04b	0,08b	0,44a	0,18ab	0,28
	H ₂	0,06a	0,05a	0,13a	0,09a	0,08
	H ₃	0,06a	0,06a	0,08a	0,05a	0,03
	H ₄	0,05a	0,07a	0,07a	0,07a	0,05

Les moyennes suivies d'une même lettre dans la même colonne ne diffèrent pas au test de la plus petite différence significative de Fisher à $\alpha=0,05$.

5-2-2-5 Capacité d'échange cationique, taux de saturation en bases et somme des bases.

Les valeurs moyennes de la somme des bases échangeables (S), du taux de saturation en bases (V) et celles de la capacité d'échange cationique (CEC) sont présentées au tableau XXIII. Les valeurs de la somme des bases sont plus élevées sur le site de Lauzoua (Guitry), par rapport aux autres sites. Les valeurs expriment une différence significative ($> \text{lsd}$) pour tous les horizons. Cependant, une croissance des

valeurs est observée de Dassoumbélé (Korhogo) à Lauzoua (Guitry) pour l'horizon H₁. Cette croissance est aussi observée pour les valeurs du taux de saturation en bases pour H₁.

Les valeurs du taux de saturation en bases ont toutes présenté une différence significative au seuil $\alpha=0,05$. Au niveau des horizons H₂ et H₃, les échantillons de Lauzoua présentent une différence significative (>lsd) par rapport aux échantillons des autres sites (Tokoré-Yaokro, Kanguélé et Dassoumbélé), constituant un groupe statistique. Les taux de saturation en bases varient de 72,31 % à 32,84 % à Lauzoua (Guitry), en climat attién ; de 9,87 % à 5,09 % à Dassoumbélé (Korhogo), en climat soudanien.

Les valeurs de la capacité d'échange cationique ont un comportement inverse des valeurs de la somme des bases et de celles du taux de saturation en bases, dans l'horizon H₁ (valeurs de V décroissantes). Les valeurs sont plus élevées au Nord (Korhogo) (valeur se situant entre 23,5 et 17,8 cmol.kg⁻¹) par rapport au Sud (Guitry) (valeur se situant entre 13,17 et 7,59 cmol.kg⁻¹).

Tableau XXIII : Valeurs moyennes des teneurs en S, V et CEC des horizons sur les différents sites.

	Horizon	Site				LSD _{0,05}
		Dassoumbélé	Kanguélé	Tokoré-Yaokro	Lauzoua	
S (cmol.kg ⁻¹)	H ₁	2,01b	3,90ab	4,13ab	5,10a	2,16
	H ₂	1,11b	2,67a	0,47b	4,09a	1,43
	H ₃	1,33ab	3,19a	0,20b	4,31a	3,08
	H ₄	1,48ab	3,15a	0,17b	2,84a	1,73
CEC (cmol.kg ⁻¹)	H ₁	22,35a	20,60a	18,49ab	13,17b	7,04
	H ₂	20,40a	16,96ab	15,81ab	11,70b	5,86
	H ₃	23,50a	23,87a	8,79b	9,93b	8,04
	H ₄	17,80ab	22,20a	8,55b	7,59b	10,42
V (%)	H ₁	9,87b	19,16b	22,54b	52,97a	27,29
	H ₂	5,19c	16,72b	3,36c	32,84a	9,81
	H ₃	5,09b	12,93b	2,13b	46,58a	24,72
	H ₄	8,32ab	14,12ab	2,34b	72,31a	69,25

Les moyennes suivies d'une même lettre sur la même ligne ne diffèrent pas au test de la plus petite différence significative de Fisher à $\alpha=0,05$.

5-2-3 Relations entre les paramètres physico-chimiques des sols

Les relations entre éléments physico-chimiques dans les sols de Dassoumbélé (Korhogo) sont présentées au tableau XXIV. Le pH du sol est lié, de façon significative, et négativement, à la matière organique et à l'azote total (respectivement -0,62 et -0,52). L'évolution du pH est donc inversement proportionnelle à celle de la matière organique et de l'azote total. Le phosphore total est significativement lié à la CEC (0,62), c'est dire que ces deux composantes évoluent de la même manière. Le Ca^{2+} a des corrélations positives, hautement significatives, avec K^+ (0,71) et V(0,77), et très hautement significatives avec $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ (0,92) et S (0,93). Les corrélations observées entre l'argile et Ca^{2+} , l'argile et Mg^{2+} , sont significatives, mais négatives (respectivement -0,52 et -0,60). La destruction de l'argile permet une libération importante du Ca^{2+} et du Mg^{2+} .

Le tableau XXV montre les corrélations dans les sols de Bondoukou. Dans ces sols, la corrélation entre la matière organique et l'azote total est très hautement significative (0,98). Cette corrélation montre bien le rôle prépondérant de l'azote dans la constitution de la matière organique. L'argile est, par contre, corrélée de façon négative à la matière organique (-0,51), au calcium (-0,52) et au potassium (-0,60). Le tableau montre que la CEC est corrélée aux éléments constitutifs de la granulométrie. La relation entre l'argile et le complexe adsorbant est marquée par les corrélations entre ce dernier et la CEC (0,54), le calcium (-0,57) et le taux de saturation en bases (-0,78).

Les corrélations inter-éléments physico-chimiques dans les sols d'Attiégouakro (Tokoré-Yaokro) sont présentées au tableau XXVI. Ce tableau montre que la matière organique est corrélée, de façon hautement significative et positive, aux éléments du complexe adsorbant ((Ca^{2+} (0,58), Mg^{2+} (0,66), $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ (0,66), K^+ (0,51), S(0,69) et V(0,73)). La matière organique est aussi corrélée au phosphore assimilable (0,64), mais, aucune corrélation linéaire n'est observée avec le phosphore total. L'on observe des liaisons linéaires entre l'argile et les constituants du complexe adsorbant ((Ca^{2+} (-0,53), Mg^{2+} (-0,53), $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ (-0,57), S (-0,58) et V (-0,54)), à l'exception du K^+ , avec un faible coefficient de corrélation (-0,48).

Tableau XXIV : Coefficient de corrélation entre les attributs physico-chimiques des sols du site manganésifère de Dassoumblé (Korhogo).

Variables	pH _{eau}	pH _{kci}	MO	N	C/N	Ptotal	Pass	CEC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	K ⁺	S	V	Sable	Limon	Argile
pHeau	1																
pHkcl	0,99***	1															
MO	-0,62*	-0,58*	1														
N	-0,60*	-0,56*	0,99***	1													
C/N	-0,21	-0,18	0,42	0,32	1												
Ptotal	-0,22	-0,25	0,04	0,07	0,03	1											
Pass	0,02	0,09	0,68*	0,69*	0,44	-0,16	1										
CEC	-0,14	-0,1	0,27	0,31	0,18	0,62*	0,4	1									
Ca ²⁺	0,2	0,21	0,05	0,17	-0,49	0,18	0,3	0,36	1								
Mg ²⁺	0,23	0,2	-0,37	-0,31	-0,47	0,49	-0,25	0,3	0,47	1							
Ca ²⁺ +Mg ²⁺	0,25	0,23	-0,12	-0,01	-0,56*	0,34	0,11	0,39	0,92***	0,77**	1						
K ⁺	0,03	0,02	0	0,08	-0,55*	-0,08	0,09	-0,13	0,71**	0,39	0,68*	1					
S	0,23	0,21	-0,11	-0,01	-0,57*	0,33	0,11	0,37	0,93***	0,76**	1***	0,72**	1				
V	0,29	0,26	-0,28	-0,2	-0,67*	0,06	-0,1	-0,11	0,77**	0,69*	0,85***	0,86***	0,87***	1			
Sable	-0,27	-0,25	0,4	0,44	-0,14	-0,34	0,3	-0,12	0,45	-0,46	0,13	0,54*	0,16	0,2	1		
Limon	0,13	0,12	-0,16	-0,19	0,25	0,58*	0,05	0,39	-0,08	0,55*	0,18	-0,18	0,16	0,05	-0,72**	1	
Argile	0,29	0,26	-0,43	-0,48	0,09	0,21	-0,39	0,01	-0,52*	0,37	-0,22	-0,60*	-0,25	-0,26	-0,97***	0,54*	1
Argile+limon	0,27	0,25	-0,40	-0,44	0,14	0,34	-0,30	0,12	-0,45	0,46	-0,13	-0,54*	-0,16	0,20	-1	0,72**	0,97***

*, **, *** se réfèrent aux niveaux de significativité selon le test-t, respectivement à : P < 0,05 ; P < 0,01 ; P < 0,001.

CEC, capacité d'échange cationique ; S, somme des bases échangeable ; V, taux de saturation en base.

Tableau XXV : Coefficient de corrélation entre les attributs physico-chimiques des sols du site manganésifère de Kanguélé (Bondoukou).

Variables	pH _{eau}	pH _{kcl}	MO	N	C/N	Ptotal	Pass	CEC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	K ⁺	S	V	Sable	Limon	Argile
pHeau	1																
pHkcl	1***	1															
MO	0,03	0,04	1														
N	0,01	0,01	0,98***	1													
C/N	0,23	0,23	0,64**	0,51*	1												
MO	0,03	0,04	1	0,98***	0,64**												
Ptotal	0,28	0,24	0,19	0,12	0,57*	1											
Pass	0,02	-0,01	0,34	0,33	0,33	0,51*	1										
CEC	0,13	0,18	-0,03	-0,04	-0,05	-0,36	-0,22	1									
Ca ²⁺	0,12	0,08	0,35	0,32	0,41	0,66**	0,81***	-0,11	1								
Mg ²⁺	-0,08	-0,06	0,03	0,07	-0,13	-0,22	0,3	0,65**	0,25	1							
Ca ²⁺ +Mg ²⁺	0,02	0,01	0,22	0,23	0,14	0,23	0,67**	0,39	0,75***	0,83***	1						
K ⁺	0,12	0,09	0,65**	0,62*	0,55*	0,48	0,35	-0,16	0,63*	-0,08	0,31	1					
S	0,02	0,01	0,25	0,25	0,17	0,24	0,67**	0,38	0,76***	0,82***	1	0,36	1				
V	0,01	-0,04	0,26	0,26	0,26	0,57*	0,83***	-0,3	0,9	0,34	0,75***	0,46	0,76***	1			
Sable	-0,11	-0,14	0,43	0,47	0,19	0,18	0,47	-0,76***	0,17	-0,28	-0,1	0,11	-0,1	0,4	1		
Limon	0,14	0,14	-0,02	0	0	0,12	0,14	0,51*	0,49	0,63*	0,72**	0,45	0,73**	0,39	-0,57*	1	
Argile	0,03	0,07	-0,51*	-0,56*	-0,23	-0,31	-0,68**	0,54*	-0,57*	-0,13	-0,42	-0,47	-0,43	-0,78***	-0,79***	-0,05	1
Argile+limon	0,11	0,14	-0,43	-0,47	-0,19	-0,18	-0,47	0,76*	-0,17	0,28	0,10	-0,11	0,10	-0,40	-1***	0,57*	0,79***

*, **, *** se réfèrent aux niveaux de significativité selon le test-t, respectivement à : P < 0,05 ; P < 0,01 ; P < 0,001.

CEC, capacité d'échange cationique ; S, somme des bases échangeable ; V, taux de saturation en base.

Des corrélations positives et très hautement significatives sont observées entre le phosphore assimilable et les constituants du complexe adsorbant ((Ca²⁺ (0,85), Mg²⁺ (0,77), Ca²⁺+Mg²⁺ (0,87), K⁺(0,72), S(0,85) et V(0,89). Ces corrélations expriment le rôle prédominant du complexe adsorbant dans la pédogenèse des sols.

Au niveau de Lauzoua (Guitry), le pH du sol a une relation significative positive, avec Ca²⁺ et le taux de saturation en bases (V). Le tableau XXVII montre une corrélation positive, très hautement significative, entre la matière organique et les cations échangeables (Ca²⁺ (0,72), le Mg²⁺ (0,66), Ca²⁺+Mg²⁺ (0,76)), à l'exception de K⁺, avec lequel il n'y a aucune corrélation significative. Des relations positives sont également observées avec le taux de saturation en bases (0,55) et la somme des bases échangeables (0,74). L'argile et la somme limon+argile ont une relation négative, significative, avec la matière organique. Il n'existe pas de corrélation linéaire significative entre la capacité d'échange cationique et la matière organique. Le tableau XXVII ne présente pas de corrélation entre le phosphore assimilable et la matière organique, du fait des faibles valeurs de coefficient de corrélation. En revanche, il y a une corrélation positive (R=0,65) entre le phosphore assimilable et le phosphore total (tableau XXVII), au seuil 0,01.

De façon générale, les bases échangeables sont corrélées, positivement entre elles, mais aussi, avec la somme des bases échangeables et la CEC, dans les sols, quelle que soit la zone étudiée.

Tableau XXVI : Coefficient de corrélation entre les attributs physico-chimiques des sols du site manganésifère de Toré-Yaokro (Attiégouakro).

Variables	pH _{eau}	pH _{kcl}	MO	N	C/N	Ptotal	Pass	CEC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	K ⁺	S	V	Sable	Limon	Argile	
pH _{eau}	1																	
pH _{kcl}	0,99***	1																
MO	0	0,05	1															
N	0,02	0,07	0,99***	1														
C/N	0,07	0,07	0,7	0,64	1													
MO	0	0,05	1	0,99	0,7													
Ptotal	0,35	0,34	0,17	0,22	-0,02	1												
Pass	0,28	0,3	0,64**	0,68	0,23	0,64**	1											
CEC	0,37	0,39	0,41	0,43	0,36	0,38	0,46	1										
Ca ²⁺	0,36	0,39	0,58**	0,59**	0,29	0,32	0,85***	0,39	1									
Mg ²⁺	0,33	0,35	0,66**	0,68**	0,32	0,38	0,77***	0,62**	0,73***	1								
Ca ²⁺ +Mg ²⁺	0,37	0,4	0,66**	0,68**	0,33	0,37	0,87***	0,53*	0,95***	0,92***	1							
K ⁺	0,42	0,44	0,69**	0,68**	0,47	0,11	0,72***	0,51*	0,88***	0,85***	0,93***	1						
S	0,38	0,41	0,69**	0,70***	0,35	0,37	0,85***	0,56*	0,91***	0,94***	0,99***	0,93***	1					
V	0,28	0,32	0,73***	0,74***	0,33	0,38	0,89***	0,4	0,94***	0,86***	0,97***	0,89***	0,96***	1				
Sable	0,27	0,26	0,37	0,4	0,25	0,41	0,50*	0,73***	0,4	0,6	0,52*	0,48	0,55*	0,41	1			
Limon	-0,19	-0,16	0,14	0,13	-0,05	0,03	0,27	-0,09	0,25	0,11	0,2	0,15	0,2	0,25	-0,35	1		
Argile	0	-0,02	-0,39	-0,4	-0,12	-0,32	-0,61**	-0,41	-0,53*	-0,53*	-0,57*	-0,48	-0,58**	-0,54*	-0,35	-0,76***	1	
Argile+limon	-0,27	-0,26	-0,37	-0,40	-0,25	-0,41	-0,50*	-0,73***	-0,40	-0,60**	-0,52*	-0,48	-0,55*	-0,41	-1,0	0,35	0,35	1

*, **, *** se réfèrent aux niveaux de significativité selon le test-t, respectivement à : P < 0,05 ; P < 0,01 ; P < 0,001.

CEC, capacité d'échange cationique ; S, somme des bases échangeable ; V, taux de saturation en base.

Tableau XXVII : Coefficient de corrélation entre les attributs physico-chimiques des sols du site manganésifère de Lauzoua (Guitry).

Variables	pH _{H2O}	pH _{KCl}	MO	N	C/N	Ptotal	Pass.	CEC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	K ⁺	S	V	Argile	Limon	Sable
pH _{H2O}	—																
pH _{KCl}	0,84***	—															
MO	0,61***	0,57***	—														
N	0,51**	0,53**	0,73***	—													
C/N	0,24	0,11	0,44**	-0,23	—												
Ptotal	0,22	0,10	0,45**	0,26	0,21	—											
Pass.	0,10	-0,07	0,11	-0,03	0,12	0,65***	—										
CEC	0,12	0,30	0,16	0,32	-0,17	0,13	-0,07	—									
Ca ²⁺	0,36*	0,51**	0,72***	0,84***	-0,09	0,20	-0,07	0,42*	—								
Mg ²⁺	0,34	0,54***	0,66***	0,68***	0,03	0,23	-0,16	0,47**	0,61***	—							
Ca ²⁺ + Mg ²⁺	0,39*	0,59***	0,76***	0,83***	-0,02	0,24	-0,14	0,50**	0,86***	0,93***	—						
K ⁺	0,17	0,16	0,14	0,32	-0,12	0,06	-0,16	0,57***	0,30	0,46**	0,44**	—					
S	0,38*	0,58***	0,74***	0,83***	-0,03	0,24	-0,14	0,53**	0,85***	0,93***	0,99***	0,51**	—				
V	0,36*	0,27	0,55***	0,50**	0,15	0,10	-0,03	-0,35*	0,44**	0,27	0,38*	0,01	0,36*	—			
Argile	-0,38*	-0,35*	-0,41*	-0,35*	-0,12	-0,08	-0,04	-0,07	-0,43*	-0,19	-0,33	0,01	-0,31	-0,30	—		
Limon	0,31	0,29	0,23	0,20	0,06	0,10	0,03	0,11	0,18	0,16	0,19	-0,07	0,18	-0,03	-0,86**	—	
Sable	0,32	0,23	0,28	0,26	0,15	-0,11	-0,05	-0,20	0,35*	-0,07	0,12	0,04	0,12	0,69***	-0,39*	-0,06	—
Argile+Limon	-0,19	-0,17	-0,38*	-0,32	-0,13	0,02	-0,02	0,06	-0,53**	-0,08	-0,30	-0,11	-0,30	-0,73***	0,41*	0,11	-0,87***

*, **, *** se réfèrent au niveau de significativité selon le test-t, respectivement à : P < 0,05 ; P < 0,01 ; P < 0,001.

CEC, capacité d'échange cationique ; S, somme des bases échangeable ; V, taux de saturation en base.

5-2-4 Facteurs et processus majeurs de distribution des sols.

Les résultats de l'analyse factorielle en composantes principales (AFCP) des données obtenues sur les échantillons prélevés au niveau des horizons, dans leur ensemble, montrent une prépondérance de 6 facteurs (tableau XXVIII). Ce sont les facteurs dont la valeur propre est supérieure ou égale à 1. Dès lors, nous considérons un modèle interprétatif à 6 facteurs (F1, F2, F3, F4, F5 et F6) pour décrire l'information contenue dans les différents paramètres mesurés sur les horizons d'ensemble.

Tableau XXVIII : Valeurs propres et inertie des facteurs des 4 sites.

Variables	Facteur	Valeur Propre	Inertie (% relatif)	% Cumul Inertie
pH _{H2O}	1	5,1047	24,30	24,30
pH _{KCl}	2	3,7332	17,77	42,08
Δ pH	3	2,6256	12,50	54,58
C	4	1,7341	8,25	62,84
N	5	1,4028	6,68	69,52
C/N	6	1,1468	5,46	74,98
MO	7	0,9627	4,58	79,57
H ⁺	8	0,8588	4,08	83,66
Al ³⁺	9	0,8215	3,91	87,57
Ptotal	10	0,7046	3,35	90,92
Pass	11	0,5471	2,60	93,53
CEC	12	0,4369	2,08	95,61
Ca ²⁺	13	0,3359	1,59	97,21
Mg ²⁺	14	0,2820	1,34	98,55
K ⁺	15	0,1839	0,87	99,43
Na ⁺	16	0,1029	0,49	99,92
S	17	0,0152	0,07	99,99
V	18	0,0004	0,002	100,00
Sable	19	0,0000	0,00	100,00
Limon	20	0,0000	0,00	100,00
Argile	21	0,0000	0,00	100,00

Les six facteurs mis en jeu dans le modèle interprétatif totalisent 74,98 % de l'information contenue dans les données traitées. La perte d'information est ici égale à 25,02 %. Ce qui veut dire que l'essentiel de l'information peut être décrit grâce aux plans factoriels obtenus, en croisant deux à deux les six axes.

Sur le tableau XXIX, nous pouvons observer les corrélations qui existent entre les variables et les facteurs considérés. Nous constatons que certaines variables, sur ce tableau, chargent de manière substantielle sur plusieurs facteurs à la fois, ce qui ne facilite pas l'interprétation de ces variables. Pour faire ressortir la structure la plus simple à interpréter, nous avons effectué une rotation de la matrice initiale en utilisant le varimax normalisé.

Tableau XXIX : Matrice factorielle des horizons des 4 sites sans rotation.

Variables	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4	Facteur 5	Facteur 6
pH _{H2O}	-0,288	-0,206	-0,828	0,218	0,072	0,017
pH _{KCl}	-0,262	-0,073	-0,860	0,262	0,021	0,083
Δ pH	0,071	0,610	-0,319	0,259	-0,233	0,326
C	-0,668	0,567	0,348	-0,059	0,052	0,231
N	-0,710	0,350	0,418	0,038	0,034	0,341
C/N	-0,229	0,506	-0,251	-0,303	0,162	-0,214
MO	-0,668	0,567	0,348	-0,059	0,052	0,231
H ⁺	0,157	0,009	0,383	0,096	-0,535	-0,345
Al ³⁺	0,281	-0,299	0,310	-0,042	-0,353	0,094
Ptotal	-0,418	0,037	-0,194	-0,651	0,173	-0,161
Pass	-0,509	0,448	-0,270	-0,115	0,056	-0,225
CEC	-0,237	0,583	-0,270	-0,166	-0,547	-0,070
Ca ²⁺	-0,784	-0,449	0,022	0,159	-0,098	-0,065
Mg ²⁺	-0,627	-0,407	-0,155	-0,003	-0,357	0,302
K ⁺	-0,541	-0,291	0,139	-0,045	-0,305	-0,424
Na ⁺	-0,366	-0,079	-0,158	-0,407	-0,169	-0,132
S	-0,804	-0,461	-0,082	0,056	-0,273	0,087
V	-0,404	-0,655	0,204	0,336	0,183	0,085
Sable	-0,365	0,457	0,122	0,624	0,116	-0,378
Limon	-0,286	-0,584	0,089	-0,465	0,241	0,120
Argile	0,662	0,053	-0,215	-0,237	-0,352	0,295

La rotation de la matrice initiale est représentée graphiquement par la figure 14

La figure 14 montre que la formation du facteur 1, qui totalise 24,3 % de l'inertie, est essentiellement liée aux variables Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , S (somme des bases échangeables) et V (taux de saturation en bases). Pour le facteur 2, qui représente 17,77 % de l'inertie, ce sont les variables C, N et MO qui contribuent le plus à sa formation. L'axe factoriel 3, qui fait 12,5 % de l'inertie, discrimine les éléments comme le $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, le pH_{KCl} et l'acidité due aux ions H^+ .

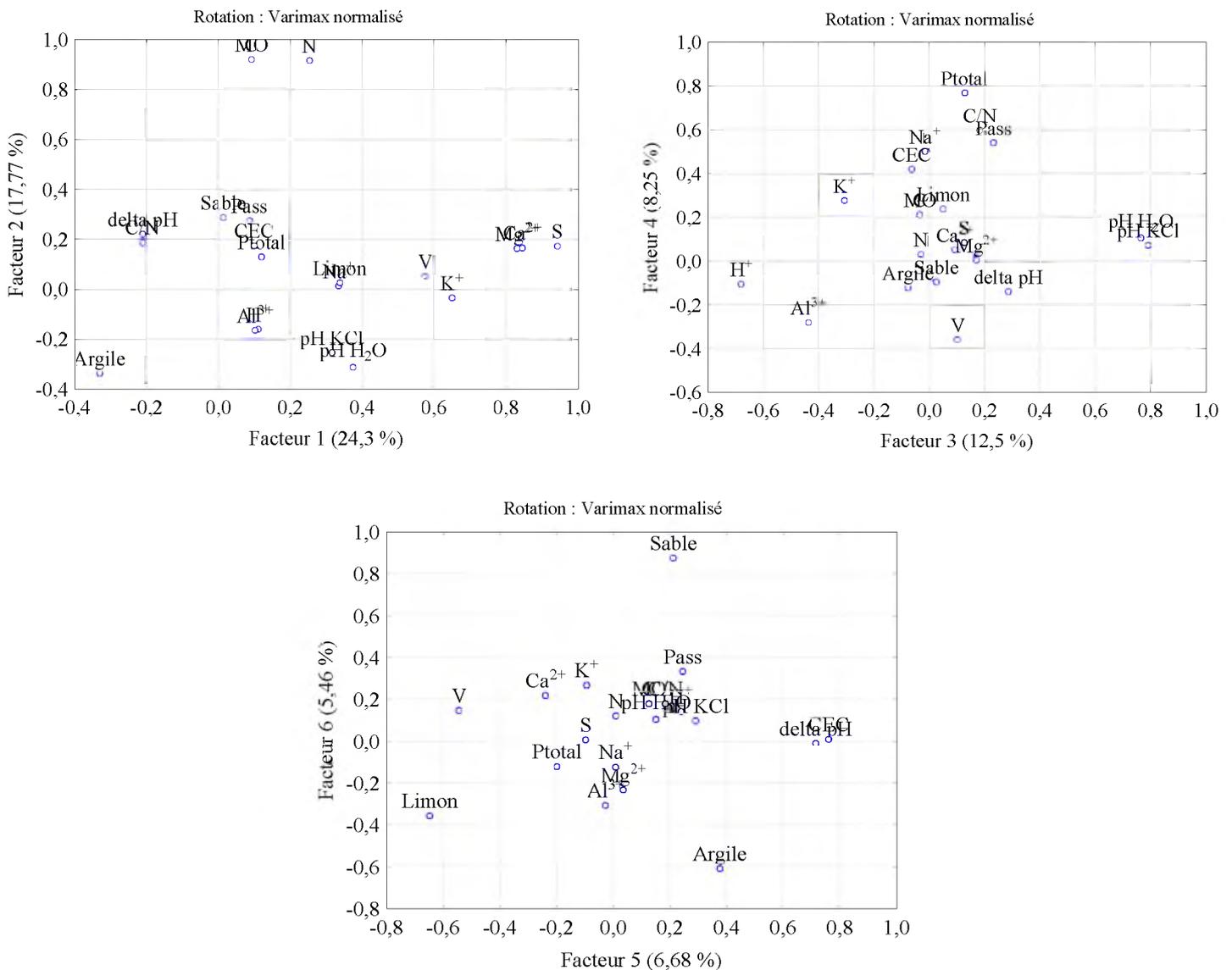


Figure 14 : Nuage des variables dans les plans F1-F2, F3-F4 et F5-F6, après rotation de la matrice initiale par varimax normalisé des 4 sites.

Avec une inertie de 8,25 %, l'axe factoriel F4 met en évidence C/N, Ptotal, Pass, Ca²⁺, Na⁺. L'axe factoriel F6 totalise 5,76 % de l'inertie. Il discrimine les argiles et les sables. Dans le même temps, nous observons que ce facteur oppose les sables et les argiles (corrélations négative).

5-3 Distribution des ETM dans les sols

5-3-1 Teneur totale en ETM

Les concentrations totales ont été mesurées pour les ETM étudiés (tableau XXX), dans tous les horizons de sol collectés pour les besoins de l'étude. L'ordre d'abondance des éléments est le suivant : Fe > Mn > Cu > Zn > Cr > Ni > Pb > Co > Cd à l'exception de Dassoumbélé (Korhogo) où Ni > Cr. Les éléments les plus variables sont Mn, Cd et Zn (CV > 40 %) ; les éléments les moins variables sont Fe, Ni et Co (CV < 25 %). Les valeurs moyennes des différents éléments ont été 172,8 mg.kg⁻¹ pour Cu, 110,73 mg.kg⁻¹ pour Zn, 9228,96 mg.kg⁻¹ pour Mn, 46699 mg.kg⁻¹ pour Fe, 1,06 mg.kg⁻¹ pour Cd, 30,93 mg.kg⁻¹ pour Cr, 27,99 mg.kg⁻¹ pour Ni et 12,15 mg.kg⁻¹ pour Co dans les sols manganésifères de Côte d'Ivoire.

Tableau XXX : Moyenne des concentrations totales en ETM (mg.kg⁻¹) dans les sols des 4 sites.

	Cu	Zn	Pb	Mn	Fe	Cd	Cr	Ni	Co
Minimum	84,10	31,00	4,50	528,75	39702,58	0,001	15,10	12,25	8,25
1 ^{er} quartile	134,07	69,12	10,00	2382,12	43499,46	0,50	23,75	22,92	9,87
Médiane	170,25	106,50	15,25	12245,29	46827,58	1,00	30,25	29,10	12,25
3 ^{ème} quartile	197,87	145,52	17,87	14215,88	49947,29	1,50	37,55	32,37	14,12
Maximum	325,75	256,00	24,70	16951,18	52077,58	2,50	49,75	38,00	16,00
Moyenne	172,80	110,73	14,32	9228,96	46699,00	1,06	30,93	27,99	12,15
CV	30	46	36	64	8	63	28	23	20
SD	51,55	50,25	5,09	5831,90	3454,57	0,66	8,45	6,41	2,38

La plupart des ETM présente, de façon globale, des corrélations significatives entre eux, au seuil $\alpha = 0,05$; seuls Ni et Co ne présentent pas de corrélations significatives, ni avec les autres ETM, ni entre eux (tableau XXXI).

Tableau XXXI : Corrélation de Pearson entre les ETM des sols étudiés.

	Cu	Zn	Pb	Mn	Fe	Cd	Cr	Ni	Co
Cu	1,00								
Zn	0,64	1,00							
Pb	-0,21	-0,09	1,00						
Mn	0,12	0,16	0,54	1,00					
Fe	0,57	0,60	-0,08	0,00	1,00				
Cd	-0,58	-0,30	0,03	0,07	-0,53	1,00			
Cr	0,22	0,17	-0,15	-0,19	0,54	-0,08	1,00		
Ni	-0,24	0,00	0,14	-0,05	0,03	0,01	0,10	1,00	
Co	-0,11	-0,20	0,14	0,09	-0,09	0,23	-0,10	0,12	1,00

5-3-2 Répartition des ETM à l'échelle du versant

Une variation des concentrations est observée entre les différents profils de sols des différents segments topographiques, et entre les horizons des profils. Les éléments sont représentés sur les graphes en fonction des niveaux de grandeur. Ainsi, Cr, Ni, Pb, Co et le Cd sont représentés sur le même graphe (figure 15), Cu et Zn sur le même graphe (figure 16), Fe et Mn sur le même graphe (figure 17). Les barres en pointillés, sur les figures, indiquent les déviations standards (écarts type).

Le chrome connaît une évolution en dent de scie, de l'horizon de surface à l'horizon de profondeur, au haut versant, comme au bas versant. Des accumulations de Cr sont observées dans l'horizon H₂, au haut versant, et au bas versant, dans l'horizon H₃. Le moyen versant présente une évolution décroissante du Cr de H₁ à H₄, avec une accumulation en H₁.

Le nickel est accumulé dans l'horizon H₁ (couche 0-20cm), puis décroît de la surface en profondeur, en haut de versant. Alors que, pour le moyen versant et le bas versant, l'accumulation est constante dans les horizons H₂ et H₃. Les teneurs décroissent ensuite dans l'horizon H₄.

Les concentrations en Pb sont décroissantes de H₁ à H₃, puis, en H₄, il y a une forte accumulation de Pb en haut de versant. Au moyen versant, c'est le phénomène inverse qui se produit. L'on observe une augmentation de la teneur de Pb de H₁ à H₃, puis, une baisse significative au niveau de H₄. En aval, c'est-à-dire en bas de versant, les teneurs en Pb sont, préférentiellement, fortes dans le haut du profil (H₁).

Les teneurs en Co croissent de H₁ à H₃, et tendent à se stabiliser entre H₃ et H₄, au haut de versant. Au moyen versant, une accumulation est marquée dans l'horizon de surface (H₁), puis l'on observe une décroissance de H₁ à H₄. Au bas de versant, le Co est accumulé dans l'horizon H₃.

Les concentrations en Cd décroissent avec la profondeur, au haut de versant, avec les fortes teneurs en H₁ et les faibles teneurs en H₄. Pour le moyen versant, les valeurs décroissent de H₁ à H₃, augmentent en H₄. L'on observe, au bas de versant, une accumulation en H₂.

Les teneurs en Cu croissent de l'horizon H₁ à l'horizon H₃, puis amorcent une chute en H₄, au haut de versant. Au niveau du moyen versant, c'est la base du profil qui enregistre les fortes teneurs en Cu. Le bas de versant est marqué par une accumulation en H₂, puis les teneurs décroissent de H₂ à H₄.

Le zinc a une évolution opposée à celle du cuivre, en haut de versant, avec une forte teneur dans l'horizon H₁. Au niveau du moyen versant, les teneurs en Zn sont décroissantes de H₁ à H₄, alors qu'au bas de versant, les valeurs sont croissantes de H₁ à H₄.

Les concentrations en Fe du moyen versant ont une évolution opposée à celles du bas de versant. Le manganèse et le fer ont des valeurs plus ou moins régulières dans tout le profil.

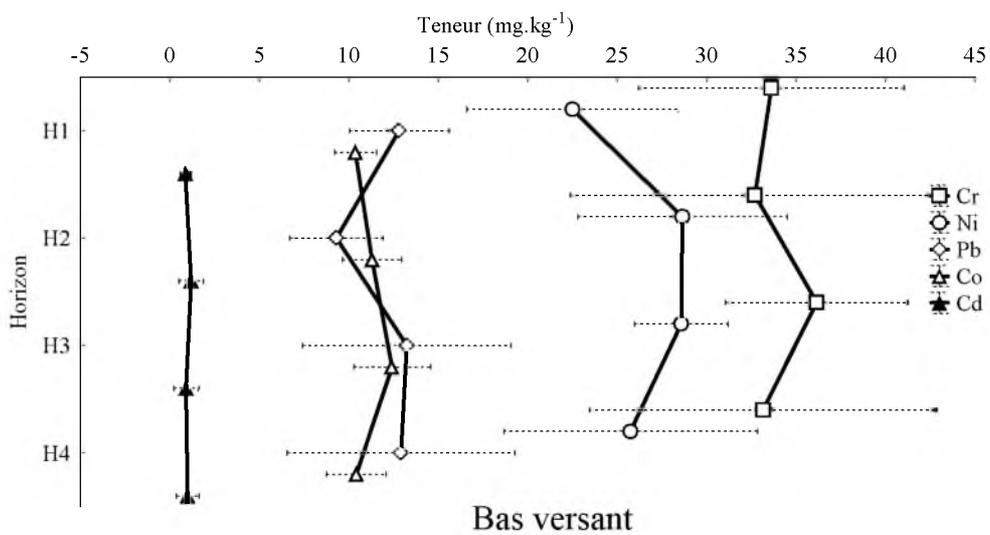
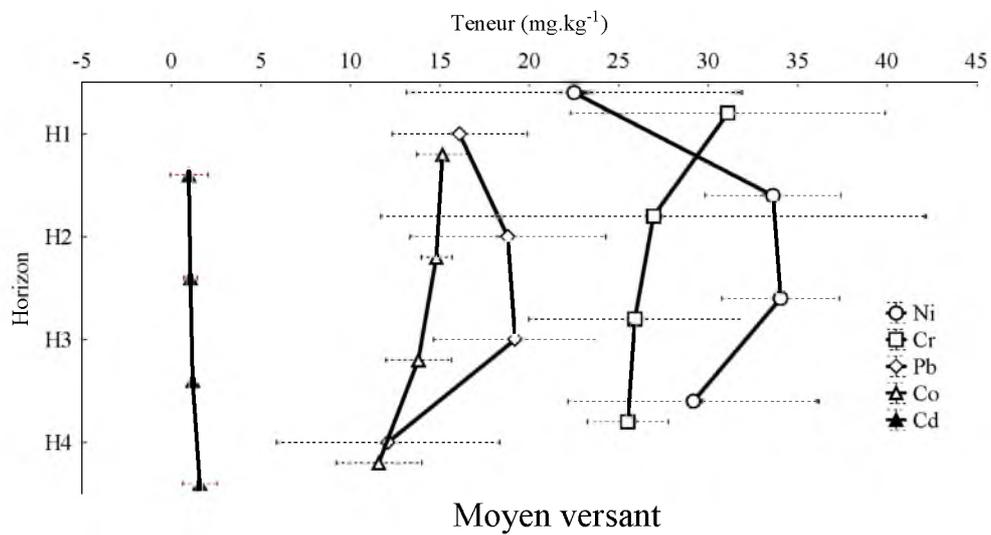
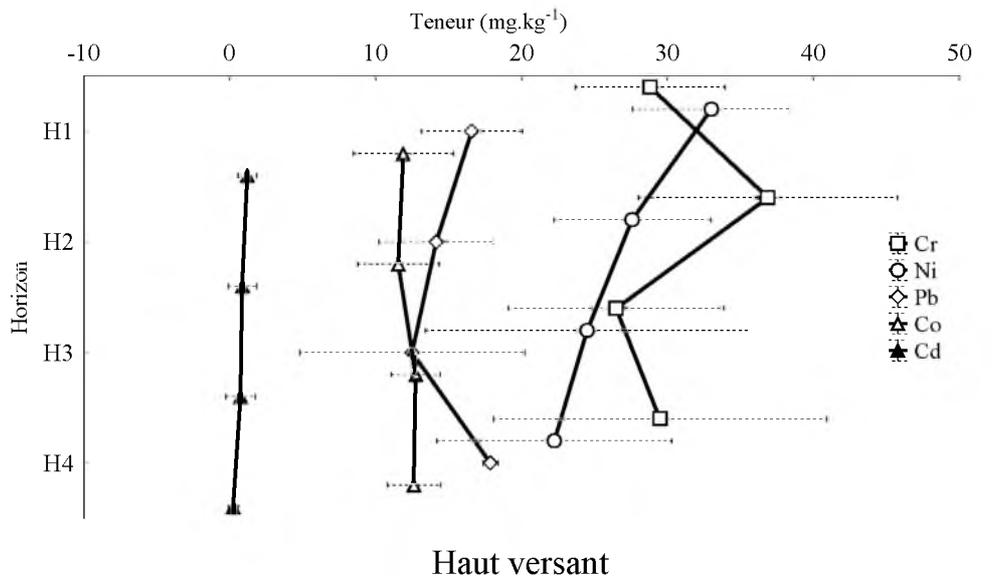


Figure 15 : Répartition de Cr, Ni, Pb, Co et Cd dans les sols en fonction des segments topographiques dans les sites.

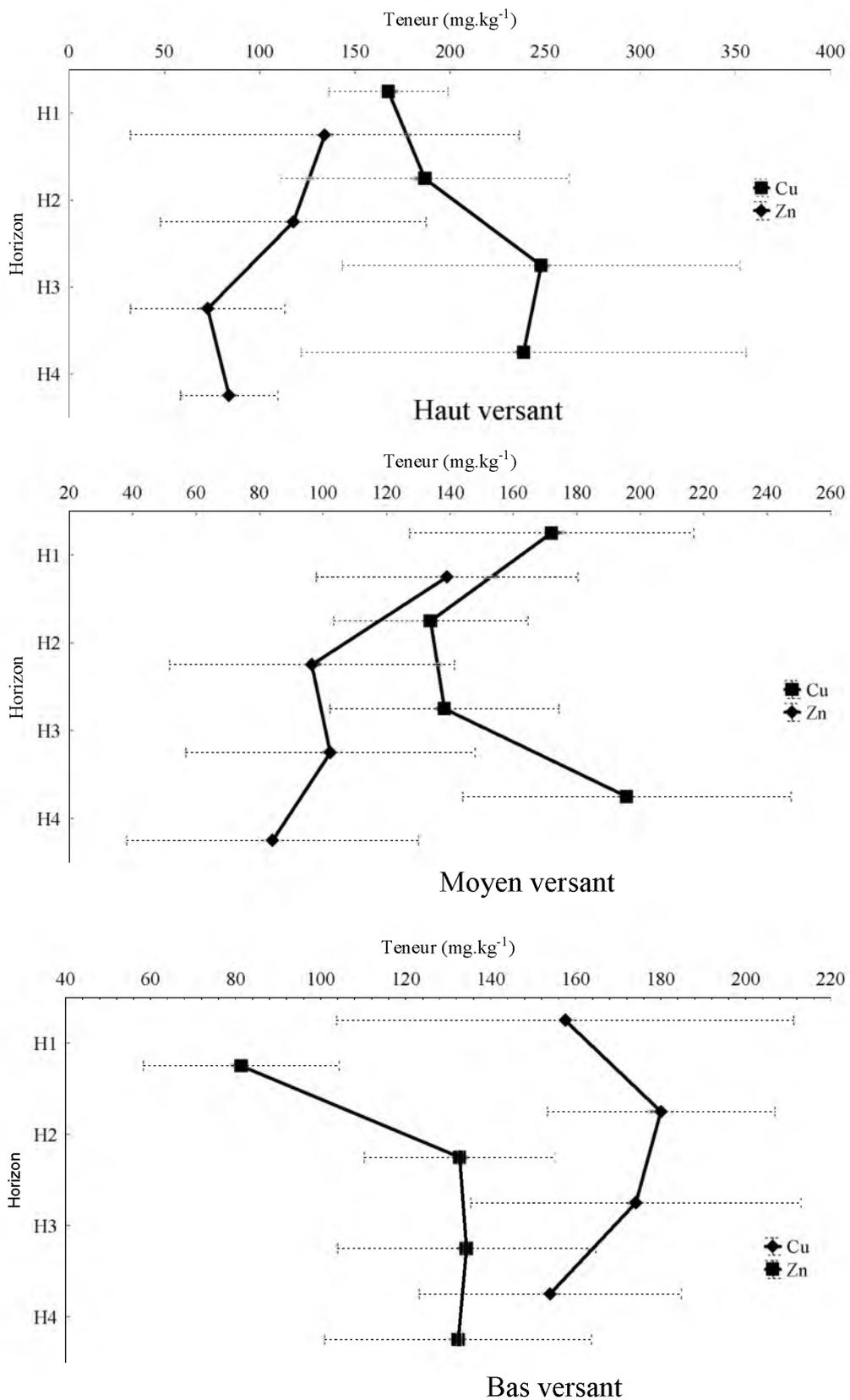


Figure 16 : Répartition de Cu et Zn dans les sols en fonction des segments topographiques dans les 4 sites.

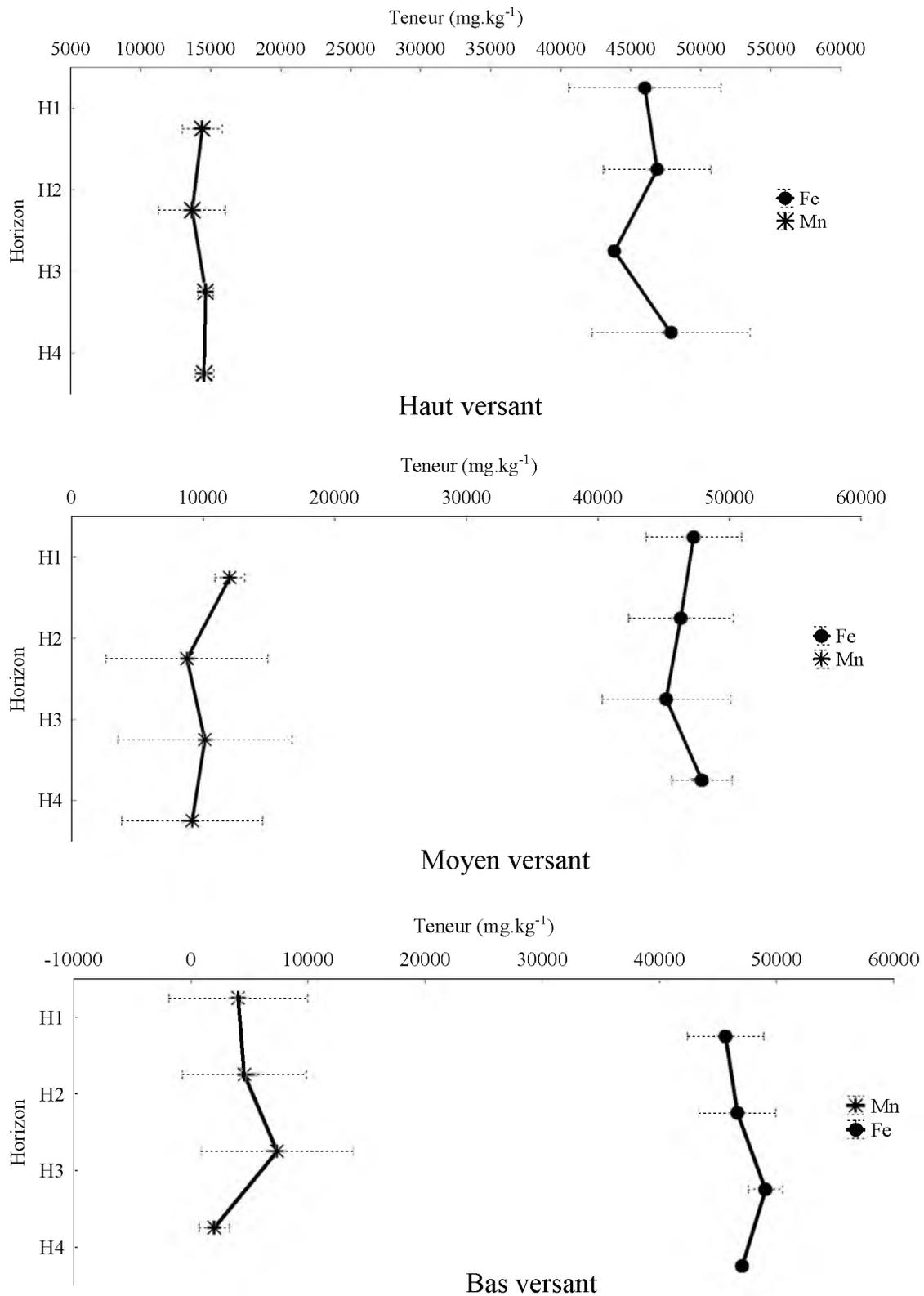


Figure 17: Répartition de Fe et Mn dans les sols en fonction des segments topographiques dans les 4 sites.

5-3-2-1 Evolution des ETM dans la couche 0-60 cm en fonction des niveaux topographiques

L'évolution des éléments traces métalliques, dans la couche 0-60cm, en fonction de la topographie est présentée à la figure 18. Seul Mn exprime une décroissance nette, avec des valeurs respectives, pour le haut de versant, le moyen versant et le bas versant, de 13786, 8735 et 4688 mg.kg⁻¹. Le fer présente plutôt une constance sur toute la toposéquence, avec 46907 mg.kg⁻¹ pour le haut versant, 45200 mg.kg⁻¹ pour le moyen versant et 46179 mg.kg⁻¹ pour le bas de versant. Le cuivre et le zinc ont une évolution similaire le long de la toposéquence, en forme de cloche renversée. Les faibles valeurs sont observées au moyen versant, 126 et 92 mg.kg⁻¹, respectivement, pour Cu et Zn. Les valeurs les plus fortes sont celles du haut versant (184 et 130 mg.kg⁻¹, respectivement, pour Cu et Zn). Les valeurs intermédiaires sont celles du bas versant (178 et 114 mg.kg⁻¹, respectivement, pour Cu et Zn). Les concentrations en Pb et en Co présentent des évolutions plus ou moins en cloche. Les plus fortes valeurs, 18 et 14,5 mg.kg⁻¹, se retrouvent au moyen versant, respectivement, pour Pb et Co. Le haut de versant présente des teneurs en Pb et Co, respectivement, de 15 et 11 mg.kg⁻¹, pour le bas versant, les valeurs sont 11 mg.kg⁻¹ pour les deux éléments (Pb et Co). Au niveau de Ni, les valeurs sont décroissantes, selon la toposéquence, et tendent à se stabiliser au moyen et au bas versant, avec des teneurs de 26 mg.kg⁻¹. Les teneurs en haut de versant sont de 30 mg.kg⁻¹. Les concentrations en Cr et en Cd sont plus ou moins constantes sur toute la toposéquence. Les teneurs observées ne présentent pas de gradient latéral, d'amont en aval, suffisamment marqué.

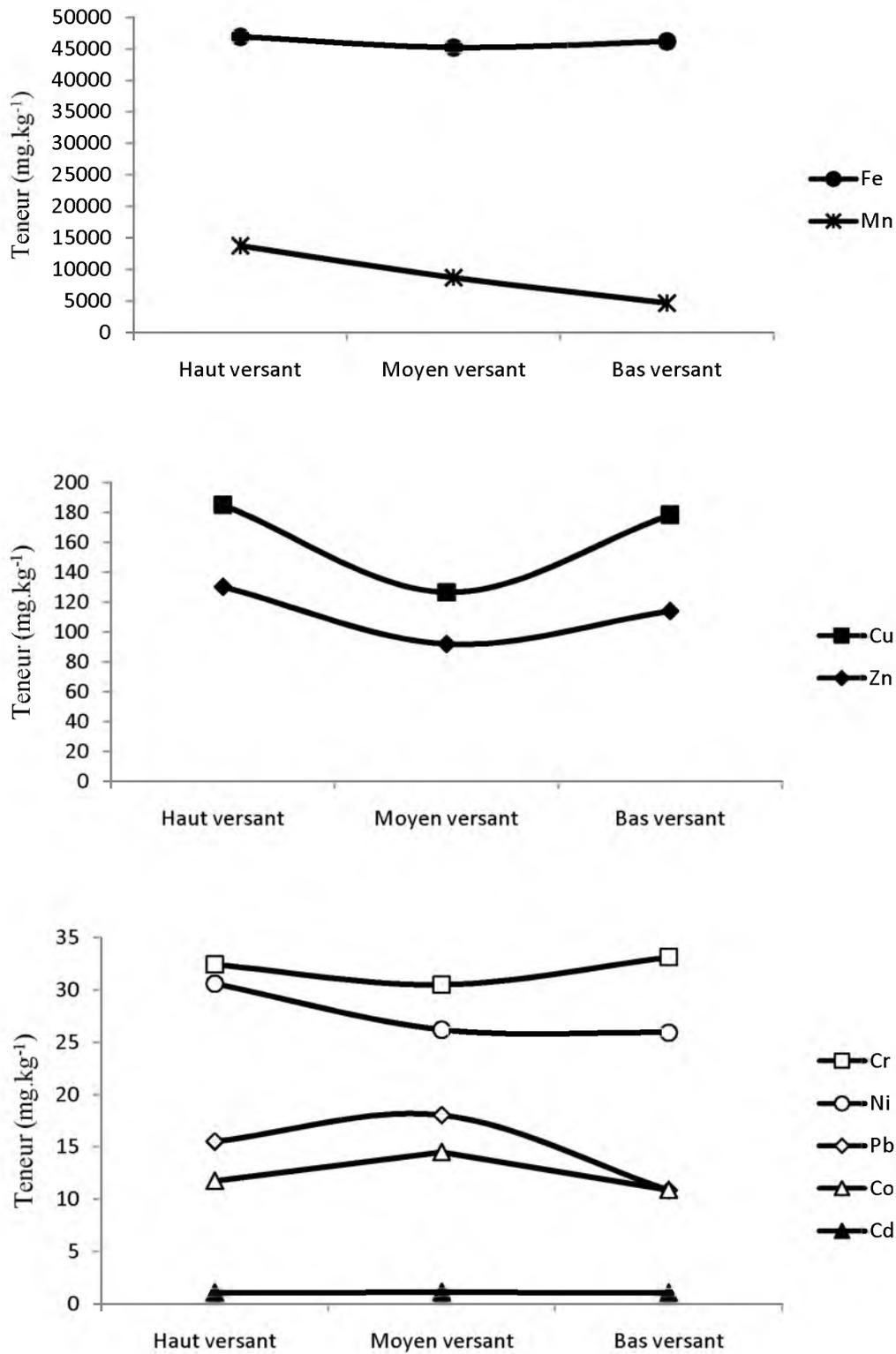


Figure 18 : Variation des teneurs en ETM de la couche 0-60 cm des sols en fonction des segments topographiques des 4 sites.

5-3-3 Evolution des teneurs en ETM en fonction de la profondeur et par site

L'ordre d'abondance des ETM sur chaque site, pris individuellement, est identique à l'ordre d'abondance global ($Fe > Mn > Cu > Zn > Cr > Ni > Pb > Co > Cd$), à l'exception de Dassoumbélé (Korhogo), où $Ni > Cr$. Les dynamiques des ETM dans les profils des différents sites étudiés sont présentées sur les figures 19, 20 et 21. Les éléments sont regroupés par ordre de grandeur sur les différents graphes.

Les profils de Dassoumbélé (Korhogo) présentent une forte teneur en Ni dans l'horizon H_2 , puis, les valeurs en Ni ont été décroissantes jusqu'à H_4 . Ce comportement est aussi observé à Kanguélé (Bondoukou) et à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro). Par contre, Ni s'accumule en H_3 à Lauzoua (Guitry).

Les teneurs en Cr sont croissantes de H_1 à H_3 sur le site de Dassoumbélé (Korhogo), alors qu'à Kanguélé (Bondoukou), ils croissent de H_1 à H_2 , puis, diminuent jusqu'à H_4 . A Tokoré-Yaokro (Attiégouakro), la teneur en Cr est croissante de H_1 à H_2 , puis se stabilise en H_3 pour décroître en H_4 . Au niveau de Lauzoua (Guitry), les teneurs en Cr sont décroissantes de H_1 à H_2 , ensuite, elles commencent à croître, pour s'accumuler en H_4 .

Les teneurs en Pb diminuent de H_1 à H_2 , puis, de H_3 à H_4 , avec les valeurs fortes en surface, et les faibles valeurs en profondeur, à Dassoumbélé (Korhogo). A Kanguélé (Bondoukou), les concentrations en Pb sont croissantes et s'accumulent en H_4 . Au niveau de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro), les teneurs en Pb sont décroissantes de la surface en profondeur, avec les fortes teneurs en surfaces. Par contre, les teneurs sont croissantes de H_1 à H_3 , et chutent en H_4 , à Lauzoua Guitry.

Les teneurs en Co se concentrent à Dassoumbélé (Korhogo) dans l'horizon H_3 , après une croissance de H_1 à H_3 . Mais, à Kanguélé (Bondoukou), à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro) et à Lauzoua (Guitry), les teneurs en Co sont préférentiellement accumulées en surface (horizon H_1), les valeurs diminuent avec la profondeur.

Les teneurs en Cd dans le profil évoluent de la même manière à Dassoumbélé (Korhogo) et à Lauzoua (Guitry). A Kanguélé (Bondoukou) et à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro), l'évolution des teneurs en Cd est contraire à celui des deux autres sites. En ce qui concerne Cu, l'accumulation est marquée dans l'horizon H_3 à Dassoumbélé (Korhogo). A Tokoré-Yaokro (Attiégouakro), les teneurs en Cu se

concentrent dans l'horizon H₃, après une augmentation de H₁ à H₃. Alors que les fortes teneurs sont observées dans l'horizon le plus profond (H₄) à Kanguélé (Bondoukou) et à Lauzoua (Guitry).

Pour Zn, les fortes teneurs sont observées en surface (H₁) à Dassoumbélé (Korhogo), puis dans l'horizon H₂, à Kanguélé (Bondoukou). A Tokoré-Yaokro (Attiégouakro), les teneurs en Zn augmentent de H₁ à H₂, puis, de H₃ à H₄, avec des valeurs fortes et similaires en H₂ et en H₃. Mais, à Lauzoua (Guitry), les teneurs sont croissantes de H₁ à H₃, puis, baissent en H₄.

Les teneurs en fer sont croissantes de H₁ à H₄ (zone d'accumulation) à Lauzoua (Guitry). A Dassoumbélé (Korhogo), Kanguélé (Bondoukou) et à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro), les teneurs de Fe sont décroissantes avec la profondeur du sol, avec les fortes teneurs en surface (H₁ et H₂).

Le manganèse se concentre préférentiellement dans l'horizon de surface à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro). Par contre, à Dassoumbélé (Korhogo), Kanguélé (Bondoukou) et à Lauzoua (Guitry), les forts taux sont observés en profondeur, respectivement, en H₄ et en H₃, après une augmentation des teneurs.

5-3-3-1 Comparaison des concentrations en ETM dans les couches superficielles (0-60 cm) du sol des différentes zones d'études

Les figures 22 et 23 présentent les teneurs des différents éléments traces métalliques (Fe, Mn, Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Co et Cd) dans la tranche 0-60 cm du sol, sur les différents sites étudiés. Les teneurs moyennes des éléments les plus abondants dans les sols tels que Fe et Mn sont significativement différents au seuil $\alpha=0,05$, selon le test de Tukey. Les teneurs enregistrées à Lauzoua (Guitry) (43069 mg.kg⁻¹), pour Fe, ont été relativement faibles, par rapport aux deux autres sites (Kanguélé (47246 mg.kg⁻¹) et de Dassoumbélé (47795 mg.kg⁻¹)), qui présentent des concentrations similaires. Par contre, les teneurs de Fe à Tokoré-Yaokro sont plus élevées (59657 mg.kg⁻¹). En ce qui concerne Mn, nous observons une disparité des concentrations : 5006 mg.kg⁻¹ à Kanguélé, 9469 mg.kg⁻¹ à Dassoumbélé, 13339 mg.kg⁻¹ à Tokoré-Yaokro et 13793

mg.kg⁻¹ à Lauzoua. Néanmoins les teneurs à Tokoré-Yaokro et à Lauzoua sont similaires.

Des différences significatives sont aussi observées pour les teneurs en Cr, Pb, Co et en Cd. Pour Cr, nous observons que les valeurs, à Dassoumbélé, à Tokoré-Yaokro et à Lauzoua, sont comparables (28, 28 et 27 mg.kg⁻¹, respectivement) et sont inférieures à celles de Kanguélé (39 mg.kg⁻¹). Les teneurs de Pb à Dassoumbélé, Kanguélé et à Lauzoua sont homogènes (15, 13, 16 mg.kg⁻¹, respectivement). Les teneurs de Pb les plus fortes sont celles de Tokoré-Yaokro (22 mg.kg⁻¹). Les teneurs de Co sont, respectivement, de 10, 12, 16 et 13 mg.kg⁻¹, pour les sites de Dassoumbélé, Kanguélé, Tokoré-Yaokro et Lauzoua. Les différences sont observées entre Dassoumbélé et Tokoré-Yaokro au seuil $\alpha = 0,05$. Les teneurs en Cd sont décroissantes de Dassoumbélé à Lauzoua, en passant par Kanguélé et Tokoré-Yaokro, avec les valeurs respectives de 0,6 ; 1 ; 0,9 et 1,6 mg.kg⁻¹. Les différences sont observées pour Cd, entre Dassoumbélé et Lauzoua, au seuil $\alpha = 0,05$.

Les autres éléments, à savoir : Zn, Ni et Cu, ne présentent pas de différence significative au seuil $\alpha=0,05$. Les concentrations en ces éléments présentent des valeurs plus ou moins homogènes sur les différentes zones d'étude. Les teneurs en Cu sont, pour Dassoumbélé, Kanguélé, Tokoré-Yaokro et Lauzoua, respectivement, de 158, 185, 164 et 144 mg.kg⁻¹. Les concentrations en Zn ont varié de 144 mg.kg⁻¹, pour Dassoumbélé à 84 mg.kg⁻¹, pour Lauzoua, en passant par 110 mg.kg⁻¹ à Kanguélé et 73 mg.kg⁻¹ à Tokoré-Yaokro. Les teneurs en Ni sont de 24 mg.kg⁻¹ à Lauzoua, 28 mg.kg⁻¹ à Kanguélé, 29 mg.kg⁻¹ à Tokoré-Yaokro et 29 mg.kg⁻¹ à Dassoumbélé.

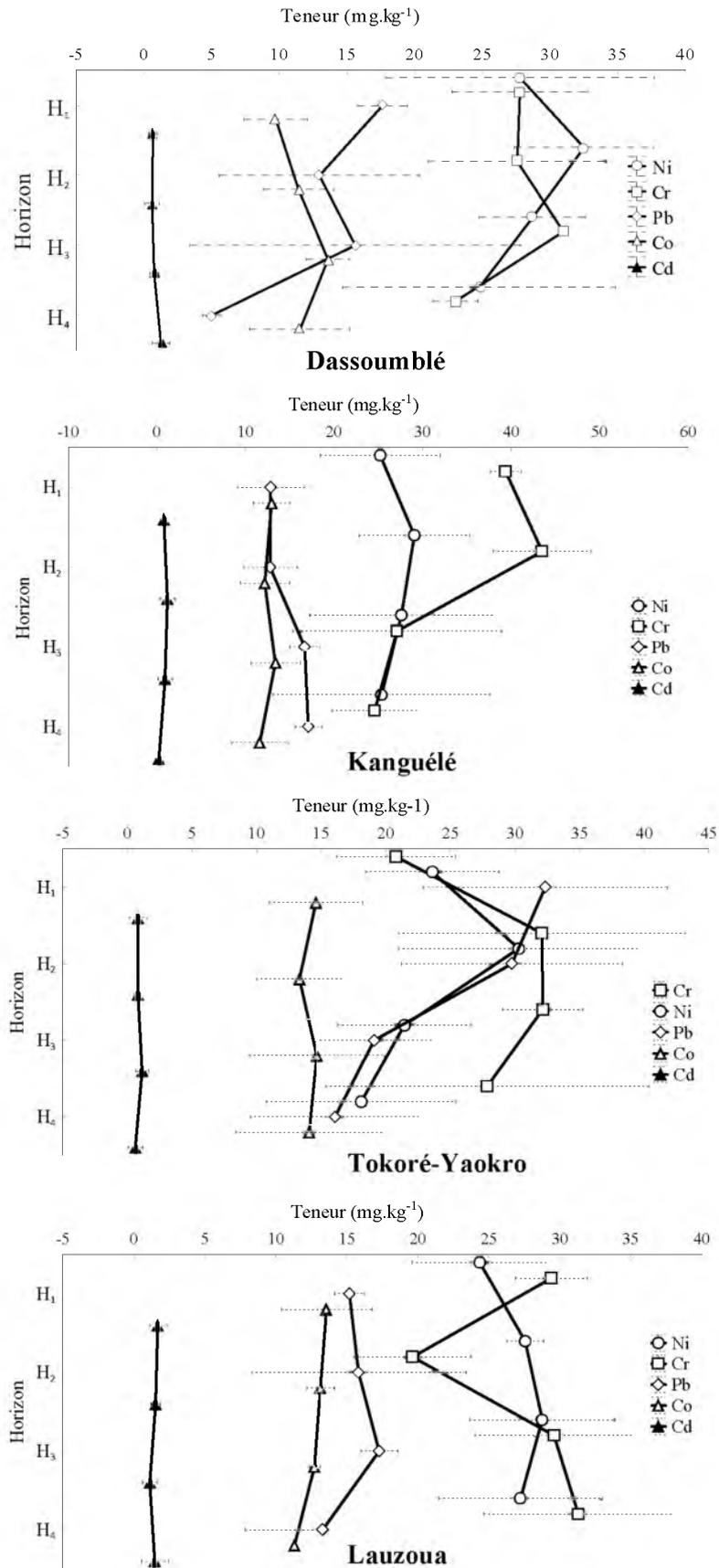


Figure 19 : Evolution des teneurs en Cr, Ni, Pb, Co et Cd en fonction de la profondeur du sol des différents sites étudiés.

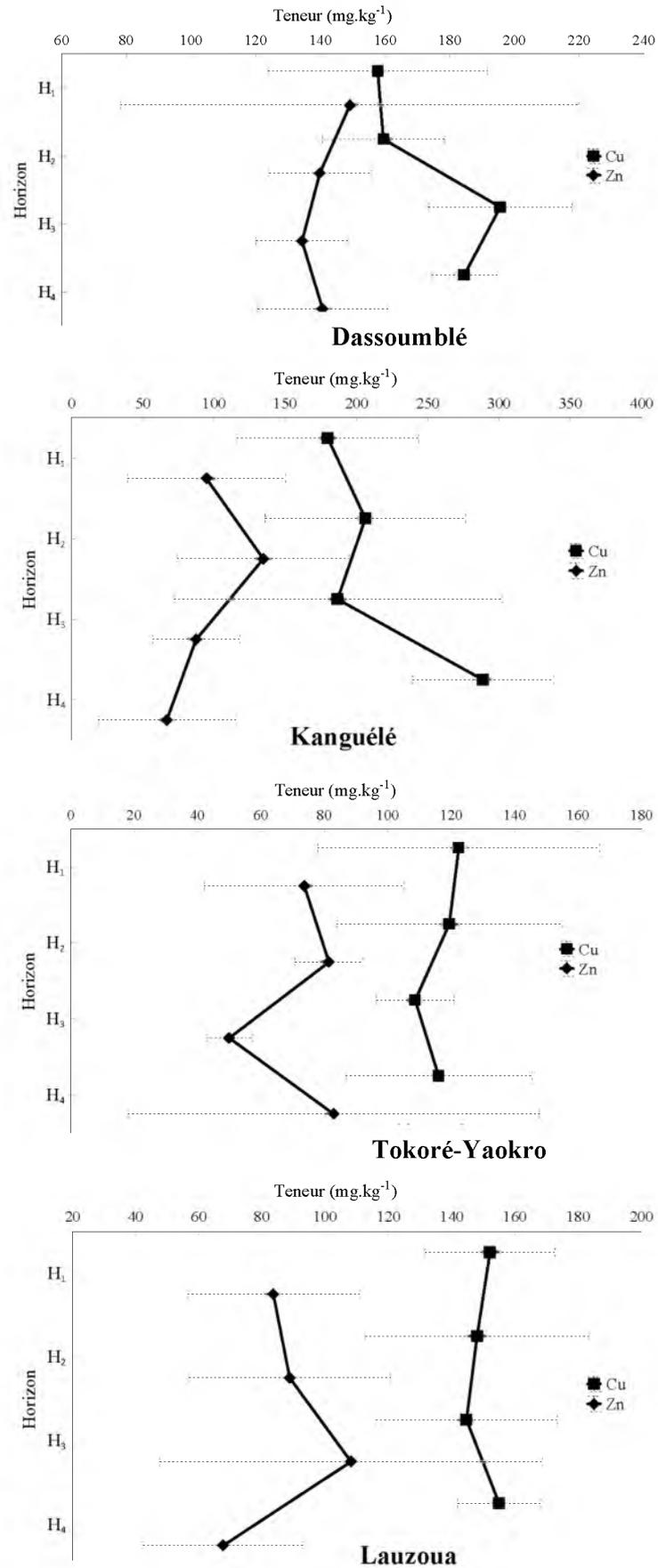


Figure 20 : Evolution des teneurs en Cu et en Zn en fonction de la profondeur du sol des différents sites étudiés.

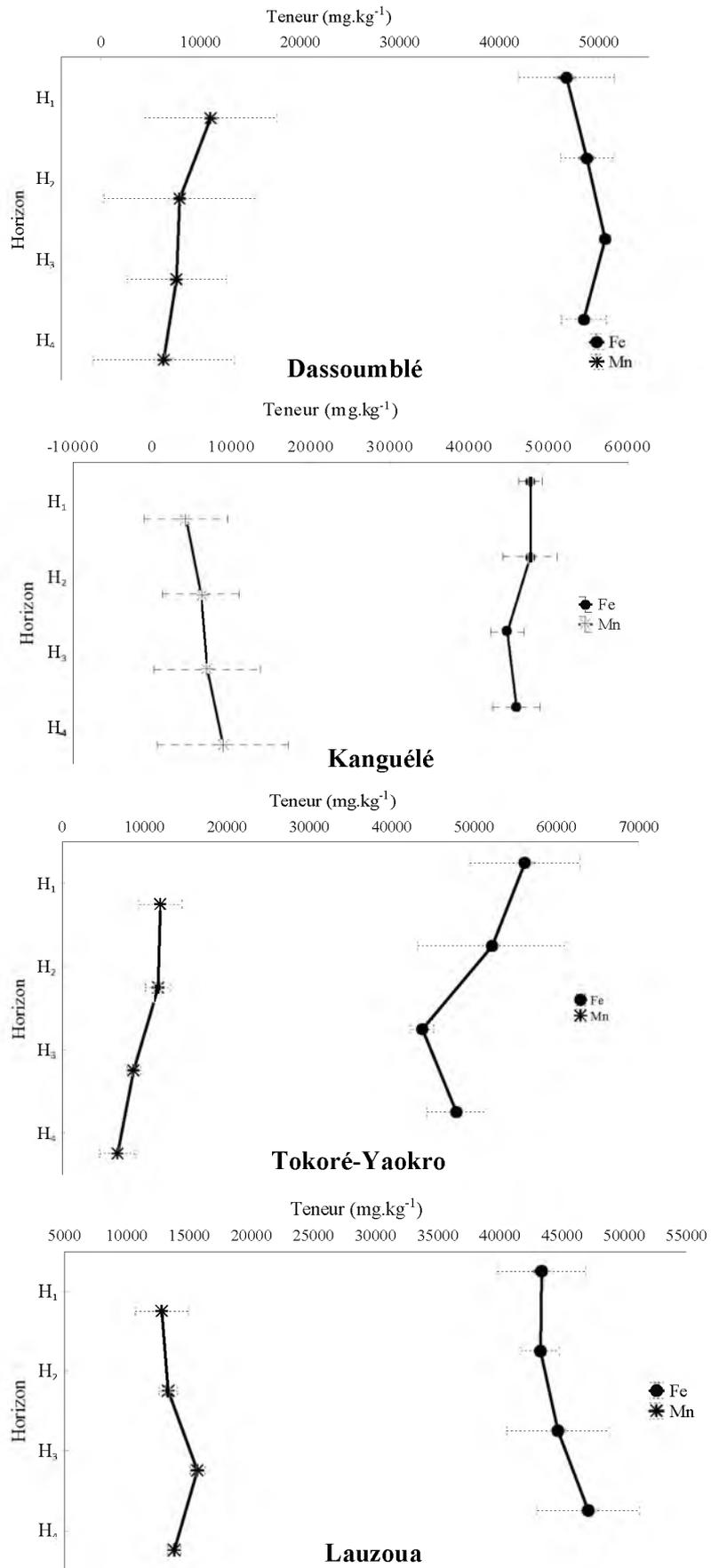
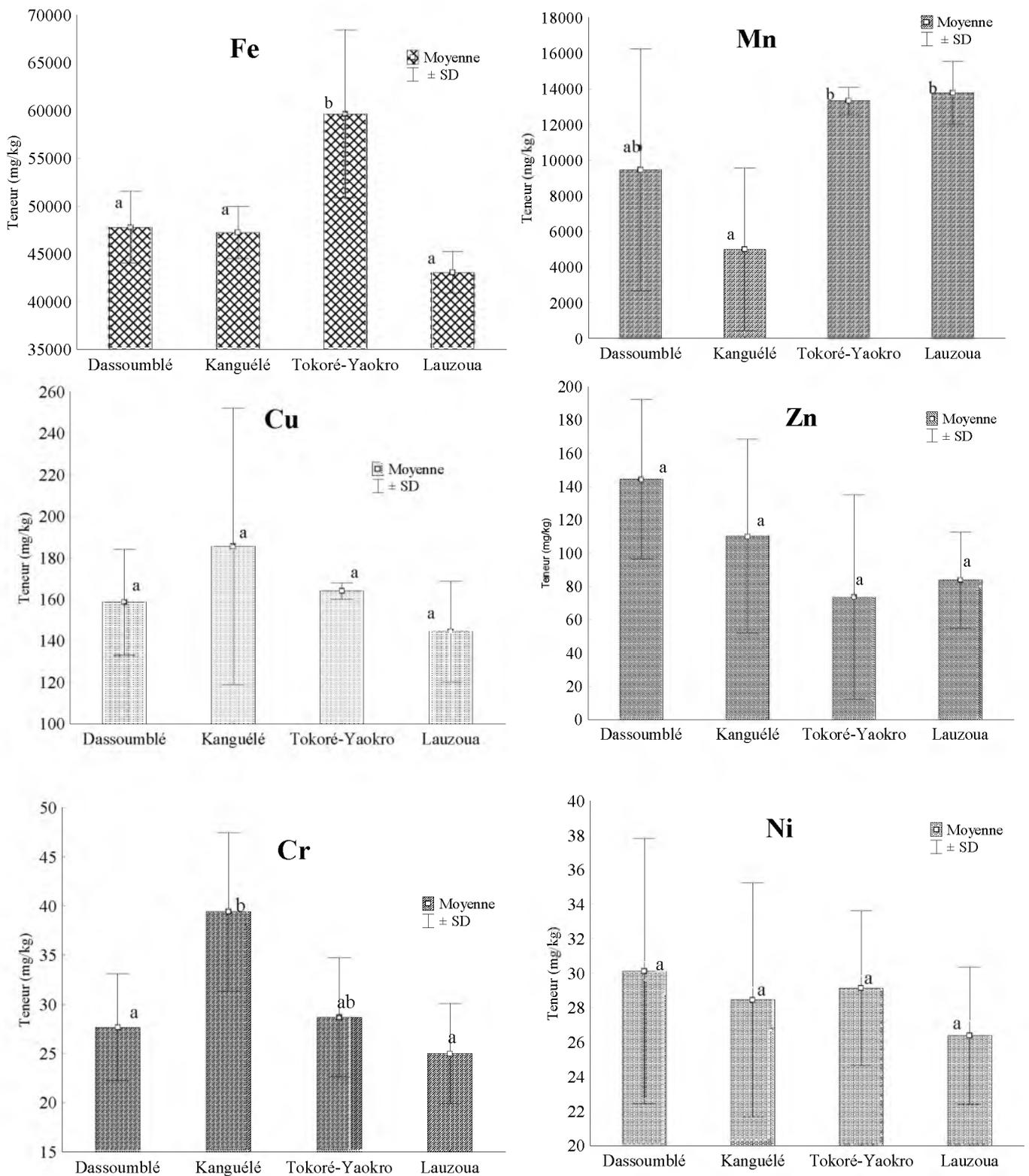
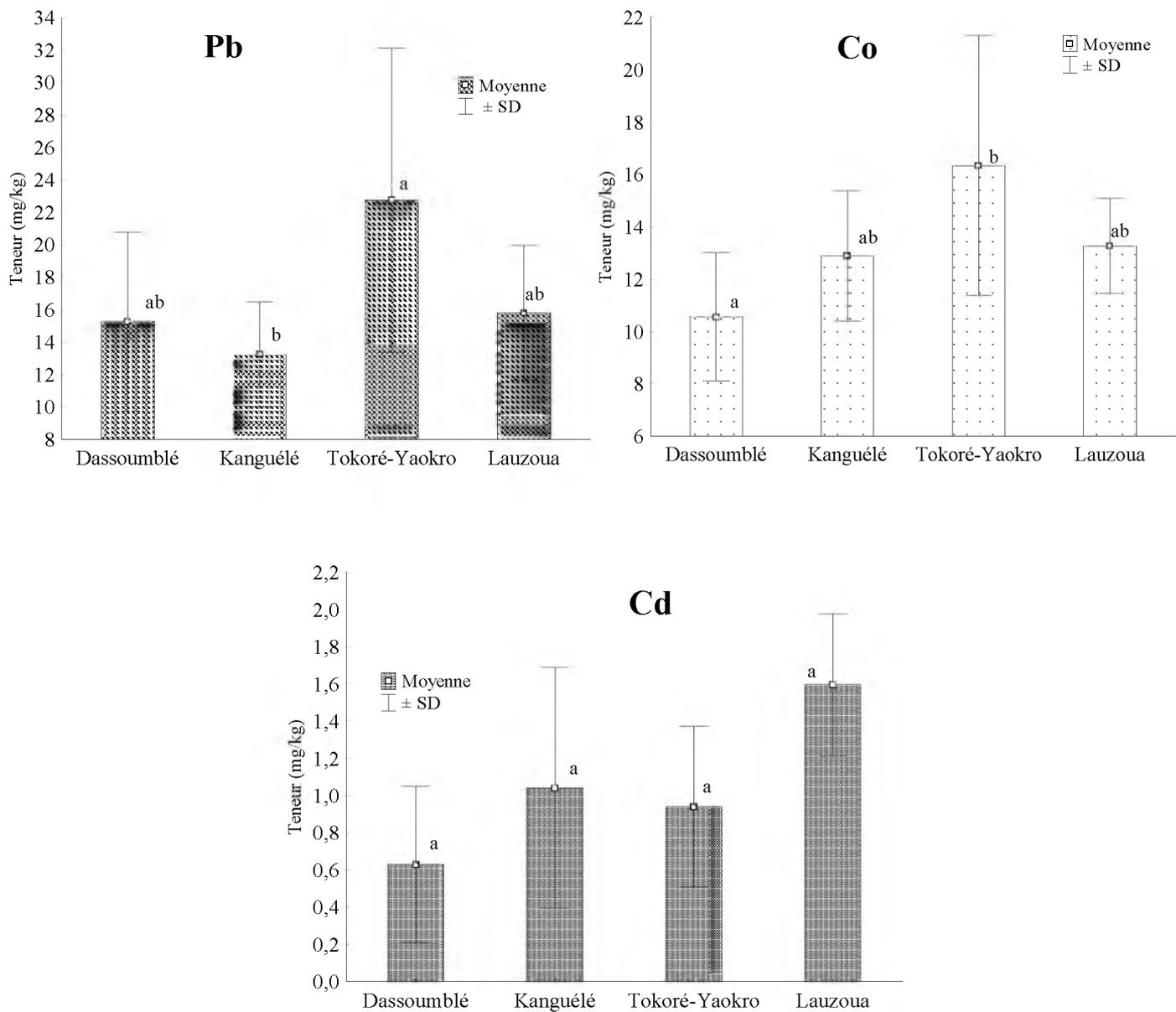


Figure 21 : Evolution des teneurs en Fe et en Mn en fonction de la profondeur du sol des différents sites étudiés.



Les lettres a, b expriment des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.

Figure 22 : Variation des teneurs en Fe, Mn, Cu, Zn, Cr et Ni dans la couche 0-60 cm des sols en fonction des sites d'étude.



Les lettres a, b expriment des différences significatives au seuil $\alpha=0,05$ selon le tes de Tukey.

Figure 23 : Variation des teneurs en Pb, Co et Cd dans la couche 0-60 cm des sols en fonction des sites d'étude.

5-3-4 Facteurs de contrôle de la mobilité des ETM dans le sol

5-3-4-1 Estimation du facteur d'enrichissement (FE)

Dans le cadre de cette étude, les facteurs d'enrichissement (FE) ont été calculés par rapport à l'horizon de sol le plus profond, et avec Fe comme élément de référence (tableau XXXII). Les facteurs d'enrichissements supérieurs à 2 sont indiqués en gras dans le tableau. Des enrichissements significatifs sont relevés pour les horizons de surface des sols de Dassoumbélé (Korhogo), pour Pb, et ceux de Kanguélé (Bondoukou), pour Cd. Excepté ces deux éléments traces (Pb et Cd), tous les autres ETM ne présentent pas d'enrichissement. La zone de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro) et celle de Lauzoua (Guitry) ne présentent pas d'enrichissement, pour aucun des éléments étudiés.

Tableau XXXII : Facteur d'enrichissement (FE) en ETM dans les sols des différents sites étudiés.

		FE							
		Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	Cd
Dassoumbélé	H ₁	1,81	0,89	1,10	1,16	1,25	3,65	0,88	0,55
	H ₂	1,25	0,86	0,99	1,30	1,19	2,57	0,99	0,47
	H ₃	1,15	1,02	0,91	1,11	1,29	2,99	1,13	0,57
Kanguélé	H ₁	0,46	0,60	1,36	0,96	1,54	0,72	1,07	3,12
	H ₂	0,66	0,69	1,94	1,11	1,70	0,72	1,01	4,65
	H ₃	0,80	0,66	1,34	1,12	1,13	1,00	1,18	3,90
Tokoré-Yaokro	H ₁	1,51	0,89	0,75	1,11	0,63	1,71	0,88	1,1
	H ₂	1,59	0,94	0,9	1,53	1,05	1,69	0,86	1,21
	H ₃	1,41	1,02	0,65	1,29	1,26	1,3	1,13	1,97
Lauzoua	H ₁	1,01	1,07	1,34	0,97	1,02	1,24	1,30	1,24
	H ₂	1,05	1,04	1,43	1,10	0,68	1,29	1,27	1,13
	H ₃	1,20	0,98	1,68	1,11	1,00	1,37	1,19	0,81

5-3-4-2 Constituants du sol contrôlant la mobilité des éléments traces métalliques

Afin d'estimer les facteurs de contrôle de l'accumulation des ETM dans les sols, des corrélations ont été établies entre les concentrations totales en ETM et les caractéristiques des échantillons de sols susceptibles d'être responsables de la fixation des ETM dans les sols.

Les tests de corrélations ont été basés sur le coefficient de Pearson et ont concerné chaque site, pris individuellement. Ainsi, pour le site de Dassoumbélé (Korhogo), il y a quatre ETM (Mn, Ni, Pb et Cd), sur les neuf pris en compte dans l'étude, qui ont des corrélations significatives avec les caractéristiques du sol (tableau XXXIII). Le Mn est le plus corrélé aux caractéristiques du sol ; mais, de façon négative, notamment l'argile (-0,76). Seul le Cd exprime une corrélation positive et hautement significative avec le pH (0,77).

Tableau XXXIII : Coefficients de corrélation de Pearson entre les ETM et les caractéristiques physico-chimiques du sol à Dassoumbélé (Korhogo).

Variables	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	Cd
pH _{H2O}	0,27	-0,04	0,28	-0,03	0,05	-0,53	-0,07	0,52	0,77**
C	-0,43	0,25	-0,39	-0,44	0,15	0,42	0,01	-0,52	-0,37
N	-0,38	0,27	-0,42	-0,47	0,16	0,41	0,04	-0,55	-0,37
P. total	0,01	-0,62*	-0,14	-0,02	-0,03	0,05	-0,39	-0,24	0,01
P. assi	-0,36	0,27	-0,05	-0,37	0,10	0,19	0,02	-0,29	0,08
CEC	0,07	-0,29	0,21	-0,14	0,23	0,36	-0,30	-0,18	0,05
Ca ²⁺	0,30	0,22	0,01	-0,21	-0,31	0,02	-0,09	-0,11	-0,01
Mg ²⁺	0,21	-0,57	-0,12	-0,31	-0,42	-0,44	-0,27	0,39	-0,10
K ⁺	0,11	0,38	-0,23	-0,04	-0,54	-0,05	0,34	0,03	-0,38
Na ⁺	-0,03	-0,75**	0,02	-0,08	-0,16	0,11	-0,65*	-0,03	-0,25
S	0,30	-0,06	-0,06	-0,27	-0,43	-0,16	-0,15	0,09	-0,09
V	0,21	0,04	-0,16	-0,14	-0,64*	-0,34	-0,03	0,20	-0,17
Sable	0,10	0,86***	0,02	0,22	-0,04	0,51	0,35	-0,41	-0,27
Limon	-0,39	-0,87***	-0,11	-0,03	-0,22	-0,47	-0,38	0,00	0,05
Argile	0,01	-0,76**	0,02	-0,25	0,13	-0,46	-0,29	0,50	0,32

*, **, *** se réfèrent au niveau de significativité selon le test-t, respectivement à : P < 0,05 ; P < 0,01 ; P < 0,001.

Au niveau de la zone de Kanguélé (Bondoukou), 7 ETM sont corrélés aux paramètres pédologiques. Les ETM concernés sont Fe, Zn, Cu, Ni, Cr et Co (tableau XXXIV). Des corrélations positives et significatives ont été déterminées entre Fe, Ni

et Cr avec certains paramètres du sol (Ptotal, Pass, Ca²⁺, S et V). Nous observons que seuls Zn et Cu ont eu des corrélations négatives avec la CEC, avec une corrélation hautement significative pour Zn (-0,67). Une autre composante essentielle du sol, qui est l'argile, est corrélée de façon, à la fois, négative et significative, avec le Cr et le Pb. Certains ETM ont des corrélations positives et négatives avec quelques paramètres du sol. Il s'agit de Zn, qui évolue négativement avec la CEC, et positivement avec P total.

Tableau XXXIV : Coefficients de corrélation de Pearson entre les ETM et les caractéristiques physico-chimiques du sol à Bondoukou (Kanguélé).

Variables	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	Cd
pH _{H2O}	-0,25	0,10	0,04	0,10	0,13	-0,17	0,42	-0,10	0,06
C	0,12	-0,23	-0,15	-0,05	-0,26	0,24	-0,42	-0,12	0,39
N	0,08	-0,30	-0,16	-0,08	-0,28	0,30	-0,45	-0,16	0,37
P. total	0,53*	0,45	0,12	0,58*	0,30	0,20	-0,10	0,40	-0,03
P.assi	0,58*	-0,30	-0,32	0,23	0,55*	0,44	-0,39	-0,17	0,33
CEC	-0,27	-0,43	-0,61**	-0,67**	0,23	-0,15	0,47	0,17	0,18
Ca ²⁺	0,82***	-0,02	-0,11	0,37	0,40	0,46	-0,19	-0,08	0,24
Mg ²⁺	0,06	-0,63*	-0,78**	-0,36	0,31	0,41	0,05	-0,10	0,44
K ⁺	0,45	0,20	0,09	0,30	0,03	0,37	0,00	0,13	0,44
Na ⁺	0,06	-0,22	-0,51	-0,24	0,45	0,07	0,35	0,44	0,43
S	0,53	-0,45	-0,62*	-0,04	0,45	0,57*	-0,07	-0,10	0,48
V	0,82***	-0,10	-0,14	0,52	0,29	0,67**	-0,45	-0,26	0,30
Sable	0,08	-0,10	0,19	0,42	-0,26	0,29	-0,77**	-0,40	0,06
Limon	0,34	-0,09	-0,35	-0,08	0,32	0,33	0,43	0,16	0,38
Argile	-0,39	0,22	0,05	-0,48	0,07	-0,66**	0,65*	0,39	-0,40

*, **, *** se réfèrent au niveau de significativité selon le test-t, respectivement à : P < 0,05 ; P < 0,01 ; P < 0,001.

Dans la zone de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro), 3 ETM sont corrélés aux caractéristiques physico-chimiques du sol (tableau XXXV). Les ETM concernés sont Pb, Ni et Cd. Le plomb est le plus corrélé aux caractéristiques physico-chimiques du sol, de façon positive, notamment pH_{H2O} (0,61), CEC (0,75), Mg²⁺ (0,52), Na⁺ (0,64) et le sable (0,6). Les corrélations négatives sont observées pour Ni et Cd, notamment entre Ni et P total (-0,5) ; entre Cd et le limon (-0,51).

Tableau XXXV : Coefficients de corrélation de Pearson entre les ETM et les caractéristiques physico-chimiques du sol à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro).

Variables	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	Cd
pH _{H2O}	0,28	0,28	-0,12	0,17	0,38	0,08	0,61*	-0,46	0,12
C	0,56	0,31	0,23	0,32	0,05	-0,27	0,36	0,26	0,09
N	0,54	0,30	0,24	0,32	0,08	-0,31	0,37	0,26	0,04
P. total	0,37	0,14	-0,21	-0,10	-0,04	-0,15	0,19	-0,10	-0,50*
P.assi	0,27	-0,03	-0,13	-0,13	-0,17	-0,32	0,31	-0,07	-0,13
CEC	0,40	0,27	0,17	0,21	0,21	0,06	0,75***	0,29	0,21
Ca ²⁺	0,04	-0,25	-0,28	-0,30	-0,25	-0,17	0,25	-0,24	0,23
Mg ²⁺	0,08	0,01	-0,04	0,00	-0,08	-0,30	0,58*	-0,11	0,28
K ⁺	0,14	-0,03	-0,10	-0,02	-0,12	-0,14	0,48	-0,11	0,45
Na ⁺	0,24	0,49	0,37	0,42	0,18	-0,47	0,64**	0,19	0,14
S	0,09	-0,08	-0,13	-0,12	-0,16	-0,27	0,47	-0,16	0,28
V	0,09	-0,16	-0,24	-0,20	-0,19	-0,26	0,31	-0,20	0,19
Sable	0,21	0,23	0,38	0,22	0,19	-0,25	0,60*	0,23	-0,02
Limon	0,00	-0,20	-0,33	-0,26	-0,51*	-0,29	-0,23	-0,12	0,00
Argile	-0,16	0,02	0,05	0,09	0,36	0,47	-0,22	-0,06	0,02

*, **, *** se réfèrent au niveau de significativité selon le test-t, respectivement à : P < 0,05 ; P < 0,01 ; P < 0,001.

Les corrélations significatives entre les ETM et les paramètres des sols de Lauzoua (Guitry) sont présentées dans le tableau XXXVI. Le zinc est, significativement, plus lié aux caractéristiques physico-chimiques du sol que les autres ETM (Fe, Cu, Ni, Cr et Co). Les corrélations, dans cette zone, sont, pour la plupart, positives, excepté les corrélations entre K⁺ et les éléments que sont Ni (-0,63) et Co (-0,58). Une seule corrélation hautement significative est manifestée entre Zn et la matière organique (0,73). Aussi, Zn est-il corrélé au pH du sol (0,70). Nous remarquons que N présente, à Guitry, des corrélations significatives avec Zn (0,59) et Fe (0,67).

Tableau XXXVI : Coefficients de corrélation de Pearson entre les ETM et les caractéristiques physico-chimiques du sol à Lauzoua (Guitry).

Variables	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	Cd
pH _{H2O}	0,07	-0,14	0,05	0,70*	0,06	-0,13	0,23	0,23	-0,12
C	0,46	0,15	0,55	0,73**	-0,28	0,36	-0,12	-0,18	-0,28
N	0,67*	0,10	0,43	0,59*	-0,14	0,64*	0,14	-0,17	-0,54
P. total	0,03	0,36	0,33	0,51	-0,34	0,13	-0,18	-0,29	0,09
P.assi	-0,35	0,54	-0,26	0,08	0,32	0,02	-0,01	-0,03	0,06
CEC	-0,26	-0,10	0,07	0,06	-0,22	0,16	-0,14	0,12	0,46
Ca ²⁺	0,55	0,23	0,42	0,48	-0,22	0,48	0,03	-0,34	-0,50
Mg ²⁺	0,25	-0,07	0,67*	0,66*	-0,10	0,25	-0,26	0,24	-0,28
K ⁺	0,32	0,02	0,13	0,14	-0,63*	0,01	0,03	-0,58*	0,19
S	0,48	0,08	0,66*	0,69*	-0,23	0,42	-0,14	-0,08	-0,44
V	0,37	-0,10	0,10	0,27	0,11	-0,06	0,17	0,00	-0,49
Sable	0,13	-0,01	-0,27	-0,18	0,14	-0,25	0,23	-0,16	-0,26
Limon	0,21	0,08	0,51	0,65*	-0,17	0,27	-0,28	0,05	-0,03
Argile	-0,30	-0,05	-0,11	-0,32	-0,02	0,05	-0,02	0,13	0,29

*, **, *** se réfèrent au niveau de significativité selon le test-t, respectivement à : P < 0,05 ; P < 0,01 ; P < 0,001.

5-3-4-3 Expression des concentrations totales en ETM dans les sols

La concentration naturelle et/ou l'accumulation potentielle d'un ETM dans le sol peuvent être représentées par une ou plusieurs caractéristiques physico-chimiques des échantillons de sol, de manière à prédire l'accumulation maximale que pourrait supporter un sol. Des analyses de régression simple et multiple ont été réalisées, afin de déterminer quels facteurs du sol sont représentatifs de l'accumulation des ETM. Ces analyses de régression ont été basées sur les corrélations établies entre les ETM et les caractéristiques physico-chimiques des sols.

5-3-4-3-1 Expression des ETM à Dassoumbé (Korhogo)

Les modèles linéaires simples sont présentés au tableau XXXVII pour les sols de dassoumbé (Korhogo). Le Manganèse a plusieurs régresseurs (P total, Na⁺, Limon et argile). Parmi ces régresseurs, seul le limon est très hautement significatif (P < 0,001) de l'expression de Mn. L'argile et le Na⁺ sont aussi hautement significatifs de l'expression de Mn, avec R²ajusté > 0,5. L'expression de Cd, avec pH comme

régresseur, est hautement significative ($p > 0,01$), avec un coefficient de détermination ajusté, supérieur à 0,5.

Les régressions de Pb et Ni sont significatives, mais avec des coefficients de détermination ajusté relativement faibles ($R^2_{\text{ajusté}} < 0,5$). L'expression de Mn en fonction de P total se comporte de façon similaire.

Tableau XXXVII : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire simple à Dassoumbélé (Korhogo).

Expression	R^2 ajusté	P
$Cd = -2,75 + 0,77 * pH_{H_2O}$	0,54	0,004
$Pb = 28,88 - 300,77 * Na^+$	0,36	0,02
$Ni = 36,24 - 1 * V$	0,34	0,02
$Mn = 17808,34 - 20,69 * P_{\text{total}}$	0,33	0,030
$Mn = 24269,03 - 308116,86 * Na^+$	0,51	0,005
$Mn = 34574,06 - 896,75 * \text{Limon}$	0,72	0,0002
$Mn = 17787,87 - 269,48 * \text{Argile}$	0,52	0,004

Le tableau XXXVIII présente les équations de régression linéaire multiple dans la zone de Dassoumbélé (Korhogo). Seules les concentrations en Mn ont pu être estimées par régression linéaire multiple dans la zone de Korhogo. Les régresseurs utilisés sont au nombre de 4 (P total, limon, argile et Na^+) et la qualité de la régression pour chaque combinaison est indiquée, à la fois, par le coefficient de détermination ajusté ($R^2_{\text{ajusté}}$) et la statistique de Fisher. Nous observons que les régressions linéaires réalisées sur la base de ces variables sont très bien corrélées aux valeurs observées. La qualité des modélisations est bien supérieure à ce qui est obtenu par régression linéaire simple. Bien que tous les $R^2_{\text{ajustés}}$ soient supérieurs à 0,5, nous remarquons des adéquations moins bonnes pour certaines combinaisons de variables (argile et Na^+ ; P total, Na^+ et argile; P total, Na^+ et Limon). Les variables qui expliquent le mieux les concentrations de Mn à Korhogo sont le limon et l'argile, avec un coefficient de détermination ajusté de 0,84 et une probabilité de 0,0001.

Tableau XXXVIII : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire multiple à Dassoumbélé (Korhogo).

Expression	R ² ajusté	P
Mn = 33889,99 - 2,29*P total - 105860,61*Na ⁺ - 495,38*Limon - 133,57*Argile	0,89	0,0003
Mn = 32161,46 - 8,29*P total - 500,23*Limon - 158,33*Argile	0,87	0,0001
Mn = 32979,35 - 670,77*Limon - 145,47*Argile	0,84	0,0001
Mn = 36557,76 + 3,77*P total - 183432,40*Na ⁺ - 701,32*Limon	0,79	0,001
Mn = 25622,70 - 9,78*P total - 111226,12*Na ⁺ - 206,33*Argile	0,75	0,002
Mn = 23720,65 - 16,17*P total - 233,09*Argile	0,75	0,001
Mn = 25941,90 - 213561,02*Na ⁺ - 190,48*Argile	0,74	0,001

5-3-4-3-2 Expression des ETM à Kanguélé (Bondoukou)

Le tableau XXXIX montre les équations de régression des ETM en fonction des caractéristiques des sols dans la zone de Kanguélé (Bondoukou). Trois équations sur l'ensemble sont très hautement significatives ($p < 0,001$), avec des coefficients de détermination ajustés supérieurs à 0,5. Il s'agit de l'expression de Fe en fonction de Ca²⁺, de l'expression de Fe en fonction de V et de l'expression de Cu en fonction de Mg²⁺. Les équations de Cr en fonction de V et de Zn en fonction de CEC sont hautement significatifs ($F < 0,01$), mais, ici, les valeurs de R²ajusté sont inférieures à 0,5.

Tableau XXXIX : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire simple à Kanguélé (Bondoukou).

Expression	R ² ajusté	P
Ni = 11,81 + 0,20*Pass	0,24	0,042
Pb = 8,28 + 0,19*Argile	0,37	0,012
Mn = 12861,43 - 4052,48*Mg ²⁺	0,34	0,017
Fe = 42783,86 + 14,75*P total	0,22	0,050
Fe = 40989,09 + 77,84*Pass	0,28	0,030
Fe = 41805,77 + 3267,86*Ca ²⁺	0,63	0,0004
Fe = 40376,14 + 381,48*V	0,64	0,0003
Cu = 425,75 - 10,84*CEC	0,32	0,021
Cu = 328,09 - 73,27*Mg ²⁺	0,57	0,001
Cu = 344,39 - 41,32*S	0,33	0,018
Zn = 15,46 + 0,32*P. total	0,28	0,028
Zn = 267,42 - 8,10*CEC	0,40	0,009
Cr = 20,41 + 4,71*S	0,27	0,033
Cr = 17,20 + 1,12*V	0,40	0,009
Cr = 53,99 - 0,56*Argile	0,38	0,011

Les équations de régressions linéaires multiples sont présentées dans le tableau XL. Dans le cas de Kanguélé (Bondoukou), les concentrations de 4 ETM ont pu être exprimées par régression linéaire multiple (Fe, Cu, Zn et Cr). La qualité de la régression est marquée par le coefficient de détermination (R^2 ajusté) et la probabilité (P) du test de Fisher. Ici, certaines régressions présentent des R^2 ajusté < 0,5, mais sont significatives ($P < 0,05$). Les éléments tels Ca^{2+} et V sont les variables qui expriment le mieux les concentrations de Fe dans les sols de Bondoukou (R^2 ajusté = 0,66 et $P = 0,001$). Pour le cuivre, ce sont la CEC et le Mg^{2+} qui sont les variables les plus significatives de la régression (R^2 ajusté = 0,54 et $P = 0,006$). Les concentrations de Zn sont, quant à elles, exprimées par la CEC et le P total. Le coefficient de détermination ajusté est de 0,51 et la probabilité est 0,007. L'expression la plus significative de Cr est celle faisant intervenir l'argile et la somme des bases échangeable (S) comme régresseurs, avec un R^2 ajusté = 0,51 et $P = 0,007$.

Tableau XL : Expressions des concentrations des ETM par régression linéaire multiple à Kanguélé (Bondoukou).

Expression	R^2 ajusté	P
$Fe = 40703,25 + 1671,45*Ca^{2+} + 210,34*V$	0,66	0,001
$Fe = 41942,21 - 7,97E^{-02}*P_{total} - 38,90*P_{pass} + 2174,67*Ca^{2+} + 264,92*V$	0,62	0,001
$Fe = 40759,58 - 0,44*P_{total} + 1715,83*Ca^{2+} + 210,15*V$	0,62	0,005
$Fe = 40127,55 + 2,31*P_{total} + 358,76*V$	0,61	0,002
$Fe = 41876,92 - 0,57*P_{total} + 3323,07*Ca^{2+}$	0,60	0,002
$Cu = 352,72 - 1,77*CEC - 66,49*Mg^{2+}$	0,54	0,006
$Cu = 328,10 - 73,27*Mg^{2+} - 5,18E-03*S$	0,53	0,006
$Cu = 357,17 - 1,88*CEC - 63,85*Mg^{2+} - 1,97*S$	0,49	0,02
$Cu = 448,10 - 7,24*CEC - 28,468*S$	0,42	0,019
$Zn = 172,77 + 0,22*P_{total} - 6,41*CEC$	0,51	0,008
$Cr = 39,28 + 3,43*S - 0,46*Argile$	0,51	0,007
$Cr = 40,35 + 3,59*S - 6,23E-02*V - 0,48*Argile$	0,46	0,026
$Cr = 34,69 + 0,68*V - 0,32*Argile$	0,42	0,02
$Cr = 15,62 + 1,68*S + 0,88*V$	0,36	0,032

5-3-4-3-3 Expression des ETM à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro)

Le tableau XLI montre les équations de régression linéaire des ETM en fonction des caractéristiques physico-chimiques du sol à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro). Le plomb a plusieurs régresseurs (CEC, Mg^{2+} , Na^+ et pH_{H_2O}). Parmi ces régresseurs, seul CEC a un R^2 ajusté supérieur à 0,5, avec $P = 0,001$. Les autres régressions (celles de Ni, Cd et Pb avec les autres éléments) sont significatives, mais avec R^2 ajusté inférieur à 0,5.

Tableau XLI : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire simple à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro).

Expression	R^2 ajusté	p
$Pb = 12,75 + 1,06 * CEC$	0,527	0,001
$Pb = 23,14 + 23,12 * Na^+$	0,361	0,008
$Pb = -29,06 + 11 * pH_{H_2O}$	0,326	0,012
$Pb = 24,37 + 5,47 * Mg^{2+}$	0,294	0,018
$Ni = 37,64 - 0,31 * limon$	0,207	0,044
$Cd = 1,34 - 9,73E^{-04} * P.total$	0,196	0,049

Le tableau XLII présente les équations de régression linéaire multiple dans la zone de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro). Seules les concentrations de Pb ont pu être estimées par régression linéaire multiple dans la zone d'Attiégouakro. La qualité de la régression est marquée par le coefficient de détermination (R^2 ajusté) et la probabilité (P) du test de Fisher. Les régresseurs utilisés sont CEC, Mg^{2+} , Na^+ et pH_{H_2O} . La qualité des modélisations est bien supérieure à ce qui est obtenu par régression linéaire simple. Bien que tous les R^2 ajustés soient supérieurs à 0,5, nous avons remarqué des adéquations moins bonnes pour certaines combinaisons de variables. Les variables qui expliquent le mieux les concentrations de Pb à Attiégouakro sont pH_{H_2O} , CEC et Na^+ , avec R^2 ajusté = 0,61 et $P = 0,004$.

Tableau XLII : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire multiple à Tokoré-Yaokro (Attiégouakro).

Equation	R ² ajusté	P
$Pb = -10,13 + 5,03 * pH_{H_2O} + 0,70 * CEC + 8,70 * Na^+$	0,612	0,002
$Pb = -16,39 + 6,20 * pH_{H_2O} + 0,84 * CEC$	0,599	0,001
$Pb = 13,82 + 0,81 * CEC + 11,82 * Na^+$	0,576	0,001
$Pb = -16,68 + 6,18 * pH_{H_2O} + 0,79 * CEC + 4,24E^{-02} * Sable$	0,567	0,004
$Pb = -16,99 + 6,31 * pH_{H_2O} + 0,85 * CEC - 0,13 * Mg^{2+}$	0,566	0,004
$Pb = -15,31 + 5,91 * pH_{H_2O} + 0,73 * CEC - 1,31 * Mg^{2+} + 9,93 * Na^+ + 2,98E^{-02} * Sable$	0,544	0,020
$Pb = 14,02 + 0,78 * CEC + 0,36 * Mg^{2+} + 11,27 * Na^+$	0,541	0,006
$Pb = 13,95 + 0,89 * CEC + 1,71 * Mg^{2+}$	0,513	0,004
$Pb = 12,26 + 0,99 * CEC + 5,56E^{-02} * Sable$	0,492	0,005
$Pb = 14,32 + 0,92 * CEC + 1,82 * Mg^{2+} - 3,18E^{-02} * Sable$	0,473	0,013
$Pb = -24,77 + 8,16 * pH_{H_2O} + 0,397 * Sable$	0,464	0,007
$Pb = -13,18 + 7,25 * pH_{H_2O} + 16,40 * Na^+$	0,459	0,007
$Pb = 16,08 + 16,03 * Na^+ + 0,32 * Sable$	0,416	0,012
$Pb = 22,65 + 2,89 * Mg^{2+} + 16,14 * Na^+$	0,379	0,018
$Pb = 17,26 + 1,33 * Mg^{2+} + 14,22 * Na^+ + 0,26 * Sable$	0,379	0,033
$Pb = -11,71 + 7,23 * pH_{H_2O} + 3,15 * Mg^{2+}$	0,354	0,023
$Pb = 17,14 + 3,06 * Mg^{2+} + 0,34 * Sable$	0,323	0,031

5-3-4-3-4 Expression des ETM à Lauzoua (Guitry)

Les équations de régression sont présentées au tableau XLIII. Au niveau de Lauzoua (Guitry), les relations entre les ETM et les caractères physico-chimiques du sol sont plus ou moins faibles. Cela est mis en évidence par les coefficients de détermination ajustés inférieurs à 0,5. Les ETM concernés dans cette zone sont : Fe, Cu, Ni, Co, Cr et Zn. Le cuivre a deux régresseurs (Mg^{2+} et S), mais, c'est la variable Mg^{2+} qui exprime le mieux les concentrations en Cu dans les sols de Lauzoua (Guitry), avec R^2 ajusté = 0,40 plus important que celui obtenu avec la variable S (R^2 ajusté = 0,37). Le zinc a plusieurs régresseurs (pH_{H_2O} , C, N, Mg^{2+} , S et limon). Mais, l'expression de la concentration de Zn avec la variable carbone organique est plus forte, R^2 ajusté a atteint 0,48, avec une P = 0,007.

Tableau XLIII : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire simple à Lauzoua (Guitry).

Expression	R ² ajusté	P
Fe = 41381,16 + 22939,19*N	0,40	0,018
Cu = 124,05 + 11,96*Mg ²⁺	0,40	0,018
Cu = 117,73 + 7,42*S	0,37	0,020
Ni = 29,64 -18,44*K ⁺	0,33	0,029
Co = 13,66 -6,69*K ⁺	0,27	0,049
Cr = 21,68 + 41,07*N	0,35	0,024
Zn = -119,42 + 40,36*pH _{H2O}	0,44	0,011
Zn = 44,14 + 33,69*C	0,48	0,007
Zn = 56,20 + 218,15*N	0,28	0,044
Zn = 45,81+ 19,00*Mg ²⁺	0,37	0,021
Zn = 32,61 + 12,51*S	0,42	0,014
Zn = -101,53 + 3,76*limon	0,37	0,021

Le tableau XLIV montre les équations de régression linéaire multiple dans la zone de Lauzoua (Guitry). Deux éléments traces métalliques sont concernés : il s'agit de Zn et de Cu. Les équations présentées sont celles dont la probabilité est significative, au seuil $\alpha=0,05$. La régression linéaire multiple du cuivre présente un coefficient de détermination moins important par rapport à la régression linéaire simple. L'expression du zinc est marquée par deux groupes de variables comme régresseurs. Le premier groupe de variables se constitue de pH_{H2O}, de Mg²⁺ et du limon ; le second groupe comporte pH_{H2O}, C et Mg²⁺. Les coefficients de détermination et les probabilités sont identiques pour les deux équations, respectivement 0,62 et 0,012. Il faut aussi mentionner que les équations du zinc avec deux régresseurs, c'est-à-dire d'une part, les variables pH_{H2O} et C, et, d'autre part, pH_{H2O} et limon, sont hautement significatives ($F<0,01$), avec des coefficients de déterminations respectifs de 0,57 et 0,56. L'expression du zinc serait donc mieux indiquée avec ces variables.

Tableau XLIV : Expressions des concentrations en ETM par régression linéaire multiple à Lauzoua (Guitry).

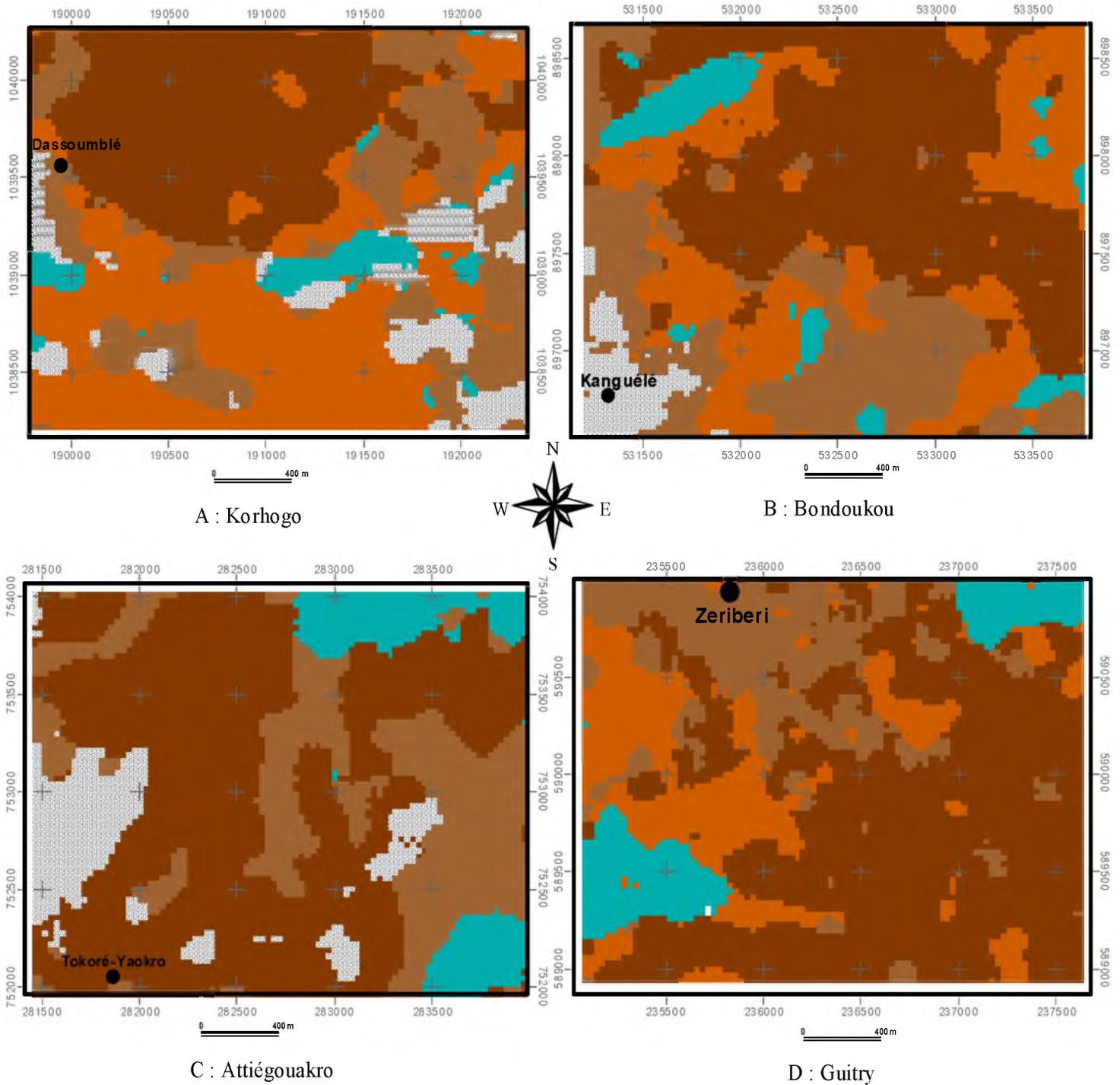
Expression	R ² ajusté	p
Zn = -141,21 + 29,15*pH _{H2O} + 10,95Mg ²⁺ + 1,10*Limon	0,62	0,012
Zn = -86,83 + 26,97*pH _{H2O} + 9,52*C + 10,96*Mg ²⁺	0,62	0,012
Zn = -65,52 + 24,24*pH _{H2O} + 22,41*C	0,57	0,009
Zn = -190,74 + 29,80*pH _{H2O} + 2,50*Limon	0,56	0,009
Zn = -127,29+ 25,93*pH _{H2O} + 12,33*C + 1,31*Limon	0,53	0,028
Zn = -65,53 + 24,23*pH _{H2O} + 22,10*C + 3,11*N	0,51	0,032
Zn = 29,82 + 31,24*C + 0,34*Limon	0,42	0,033
Zn = -51,21 + 11,57*Mg ²⁺ + 2,25*Limon	0,41	0,038
Zn = -67,28 + 124,16*N + 2,73*Limon	0,39	0,040
Cu = 118,64 + 6,98*Mg ²⁺ + 3,72*S	0,36	0,050

5-4 Cartographie des sols par télédétection

Les cartes obtenues par application de l'algorithme de classification « maximum de vraisemblance » sont présentées à la figure 24. La classification fait apparaître 5 classes que sont :

- Cambisols (Manganiferric, Dystric) ;
- Cambisols (Dystric) ;
- Endogleyic Cambisols (Dystric) ;
- Cuirasses et/ou affleurements rocheux ;
- Plinthic Cambisols (Dystric).

Les matrices de confusion associées aux cartes sont présentées au tableau XLV pour la zone de Dassoumlé (Korhogo), au tableau XLVI pour la zone de Kanguélé (Bondoukou), au tableau XLVII pour la zone de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro) et au tableau XLVIII pour la zone de Lauzoua (Guitry). L'analyse de la classification à travers les matrices de confusion montre que la précision cartographique et la précision de l'inventaire sont supérieures ou égales à 90 % pour toutes les classes obtenues dans la zone de Korhogo.



Légende

<p> Cambisols (Manganiferric, Dystric) Korhogo : 30,76 % Bondoukou : 41,22 % Attiégouakro : 56,89 % Guitry : 52,57 %</p> <p> Endogleyic Cambisols (Dystric) Korhogo : 4,55 % Bondoukou : 5,70 % Attiégouakro : 8,83 % Guitry : 8,99 %</p> <p> Plinthic Cambisols (Dystric) Korhogo : 21,92 % Bondoukou : 22,68 % Attiégouakro : 24,47 % Guitry : 18,22 %</p>	<p> Cambisols (Dystric) Korhogo : 33,94 % Bondoukou : 26,08 % Attiégouakro : 0 % Guitry : 20,22 %</p> <p> Cuirasses et/ou affleurements rocheux Korhogo : 8,83 % Bondoukou : 4,32 % Attiégouakro : 9,80 % Guitry : 0 %</p>
--	---

Figure 24 : Carte de répartition des sols sur les différents sites d'étude.

Cela montre que les confusions entre classes dans cette zone sont négligeables. Les indicateurs de classification, que sont le coefficient de kappa et la précision globale, sont, respectivement, 0,96 et 97,88 % dans la zone de Dassoumblé (Korhogo).

La classification de la zone de Kanguélé (Bondoukou) est caractérisée par de faibles erreurs d'omission ne dépassant pas 20 %. Des erreurs de commission élevées sont observées pour les classes « Cambisols (Dystric) » et « Plinthic Cambisols (Dystric) », respectivement, 26,09 % et 22,32 %. Il y a donc des confusions entre ces classes et d'autres classes. Ainsi, des confusions sont observées entre la classe « Cambisols (Dystric) » et la classe « Endogleyic Cambisols (Dystric) », entre la classe « « Plinthic Cambisols (Dystric) » et la classe « Cuirasses et/ou affleurements rocheux ». Néanmoins, les précisions de l'inventaire, ou précisions de l'utilisateur, sont toutes supérieures à 70 %. Les indicateurs dans la zone de Bondoukou ont été de 91,07 % pour la précision globale et 0,88 pour le coefficient de kappa. Ces indices témoignent de la qualité de la classification, en dépit des erreurs de commission à Bondoukou.

Au niveau de la zone de Tokoré-Yaokro (Attégouakro), la matrice de confusion montre que la précision cartographique et la précision de l'inventaire sont supérieures à 80 %. Dans cette zone, les classes observées sont au nombre 4. La classe « Cambisols (Dystric) » n'est pas observée. La précision globale et l'indice de kappa sont similaires à ceux de Bondoukou. Les valeurs sont 91,06 et 0,87, respectivement, pour la précision globale et l'indice de kappa.

La zone de Lauzoua Guitry est caractérisée par une matrice de confusion qui révèle une erreur de commission forte (49,79) concernant la classe « Plinthic Cambisols (Dystric) ». Cette dernière présente des confusions significatives entre les classes « Cambisols (Manganiferric, Dystric) » et « Cambisols (Dystric) ». Cela entraîne une précision de l'inventaire, ou précision de l'utilisateur, inférieure à 70 % pour cette classe. Les autres classes présentent des précisions supérieures à 70 %. La précision globale de la classification a été de 82,43 % et l'indice de kappa est de 0,76.

Tableau XLV : Matrice de confusion de la classification supervisée par maximum de vraisemblance sur la zone de dassoumblé (Korhogo).

	Image classifiée					Pixels total de la classification	Précision de l'inventaire (%)	Erreur de commission (%)
	Cambisols (Manganiferric, Dystric)	Cambisols (Dystric)	Endogleyic Cambisols (Dystric)	Cuirasses et/ou affleurements rocheux	Plinthic Cambisols (Dystric)			
Vérité terrain Cambisols (Manganiferric, Dystric)	354	0	0	0	0	354	100	0
Cambisols (Dystric)	0	207	4	1	1	213	97,18	2,82
Endogleyic Cambisols (Dystric)	0	0	79	0	0	79	100	0
Cuirasses et/ou affleurements rocheux	0	0	1	49	4	54	90,74	9,26
Plinthic Cambisols (Dystric)	0	2	0	3	53	58	91,38	8,62
Pixels total terrain	354	209	84	53	58	758		
Précision cartographique (%)	100	99,04	94,05	92,45	91,38			
Erreur d'omission (%)	0	0,96	5,95	7,55	8,62			
Précision globale (%)				97,88				
Coefficient de kappa				0,96				

Tableau XLVI : Matrice de confusion de la classification supervisée par maximum de vraisemblance sur la zone de Kanguélé (Bondoukou).

	Image classifiée					Pixels total de la classification	Précision de l'inventaire (%)	Erreur de commission (%)
	Cambisols (Manganiferric, Dystric)	Cambisols (Dystric)	Endogleyic Cambisols (Dystric)	Cuirasses et/ou affleurements rocheux	Plinthic Cambisols (Dystric)			
Vérité terrain Cambisols (Manganiferric, Dystric)	221	2	1	0	0	224	98,66	1,34
Cambisols (Dystric)	4	51	13	0	1	69	73,91	26,09
Endogleyic Cambisols (Dystric)	0	0	144	0	2	146	98,63	1,37
Cuirasses et/ou affleurements rocheux	0	0	0	79	9	88	89,77	10,23
Plinthic Cambisols (Dystric)	4	2	1	18	87	112	77,68	22,32
Pixels total terrain	229	55	159	97	99	639		
Précision cartographique (%)	96,51	92,73	90,57	81,44	87,88			
Erreur d'omission (%)	3,49	7,27	9,43	18,56	12,12			
Précision globale (%)				91,07				
Coefficient de kappa				0,88				

Tableau XLVII : Matrice de confusion de la classification supervisée par maximum de vraisemblance sur la zone de Tokoré-Yaokro (Attiégouakro).

		Image classifiée					Précision de l'inventaire (%)	Erreur de commission (%)
		Cambisols (Manganiferric, Dystric)	Endogleyic Cambisols (Dystric)	Cuirasses et/ou affleurements rocheux	Plinthic Cambisols (Dystric)	Pixels total de la classification		
Vérité terrain	Endogleyic Cambisols (Dystric)	12	316	0	5	333	94,89	5,11
	Cambisols (Manganiferric, Dystric)	526	11	8	15	560	93,93	6,07
	Cuirasses et/ou affleurements rocheux	11	0	222	12	245	90,61	9,39
	Plinthic Cambisols (Dystric)	22	27	12	311	372	83,6	16,4
	Pixels total terrain	571	354	242	343	1510		
	Précision cartographique (%)	92,12	89,27	91,74	90,67			
	Erreur d'omission (%)	7,88	10,73	8,26	9,33			
	Précision globale (%)				91,06			
	Coefficient de kappa				0,87			

Tableau XLVIII : Matrice de confusion de la classification supervisée par maximum de vraisemblance sur la zone de Lauzoua (Guitry).

	Image classifiée				Pixels total de la classification	Précision de l'inventaire (%)	Erreur de commission (%)
	Cambisols (Manganiferric, Dystric)	Cambisols (Dystric)	Endogleyic Cambisols (Dystric)	Plinthic Cambisols (Dystric)			
Vérité terrain Endogleyic Cambisols (Dystric)	0	13	409	0	422	96,92	3,08
Cambisols (Dystric)	7	303	52	2	364	83,24	16,76
Cambisols (Manganiferric, Dystric)	255	21	5	15	296	86,15	13,85
Plinthic Cambisols (Dystric)	48	61	7	117	233	50,21	49,79
Pixels total terrain	310	398	473	134	1315		
Précision cartographique (%)	82,26	76,13	86,47	87,31			
Erreur d'omission	17,74	23,87	13,53	12,69			
Précision globale (%)				82,43			
Coefficient de kappa				0,76			

CHAPITRE VI : DISCUSSION

6-1 Caractéristiques morphologiques et physico-chimiques des Cambisols manganésifères issus de matériaux volcano-sédimentaires

Les sols manganésifères observés dans le cadre de cette étude sont des Cambisols se développant sur matériau volcano-sédimentaire tel qu'observé par Yao-Kouamé (2008a).

Les sols de haut versant et de moyen versant sont de couleur rougeâtre (2,5YR), alors que ceux du bas versant sont de couleur jaunâtre (7,5YR). Ces résultats peuvent s'expliquer par la dynamique de l'eau tel que constaté par Koné *et al.* (2009) sur les Ferralsols. En effet, la lixiviation induite par la topographie entraîne un départ des oxydes et hydroxydes de fer, responsables de la coloration vive des sols tropicaux (Mauricio et Ildeu, 2005). L'on observe alors une décoloration de la couleur rougeâtre du sol, du haut versant vers le bas versant. La texture est, en général, fine (argileuse à limono-argileuse). Ceci a été observé par Bourgault et Rabenhorst (2011) sur sols manganésifères. Cette texture induit, notamment, dans les horizons humifères, une structure généralement bien développée et stable (structure polyédrique subanguleuse). La richesse en particules fines s'est accompagnée d'une certaine compacité, particulièrement dans les secteurs de faibles pentes. Les fortes teneurs en éléments grossiers observées font ressortir des contraintes sur le plan cultural, en accord avec les travaux de Yao-Kouamé *et al.* (2010).

Dans les zones étudiées, des divergences sont notées en ce qui concerne les caractères physiques des sols. La lixiviation et/ou le lessivage pourrait jouer un rôle important dans cette discrimination. Les teintes jaunâtres observées à Guित्रy pourraient être attribuées à la forte pluviométrie qui règne dans cette zone. En effet, selon Mauricio et Ildeu (2005), dans les zones à drainage dominant, comme à Guित्रy, avec une forte pluviométrie, il y a départ des oxydes et hydroxydes de fer, responsables de la coloration vive des sols tropicaux. Cette lixiviation du fer va réduire la coloration rouge des sols.

Le gradient textural observé de Korhogo à Guitry, en passant par Bondoukou et Attiégouakro est décroissant. Ce fait pourrait être aussi attribué au climat, qui est l'élément de discrimination des sites étudiés. Ce qui vient renforcer la thèse de certains auteurs qui estiment que le climat (la température et la précipitation) est le facteur le plus important dans la régulation des paramètres physico-chimiques des sols (Callesen *et al.*, 2003 ; Dai et Huang, 2006,).

Le pH est, généralement, inférieur à 5,5. D'après Brady et Weil (2002), il existe très peu de réactions chimiques et microbiologiques qui ne soient pas sensibles au pH. A de faibles valeurs de pH, il se produit de nombreux phénomènes néfastes à la croissance végétale, telles la diminution de la nitrification, la déficience en P, les toxicités aluminiques et manganiques, la faible mobilité des polluants organiques et la grande disponibilité de certains ETM (Landon, 1991).

Les pH proches de 5 indiquent le domaine de pH où les kaolinites sont chargées négativement, alors que les oxydes et les matières organiques sont chargés positivement. Une grande partie de la stabilité du sol peut alors être attribuée à l'attraction électrostatique entre des constituants de charge électrique de signe opposé (Tavares-Filho et Tessier, 1998). Cela explique les structures à dominance polyédrique subanguleuse.

Au niveau de la toposéquence, le haut de versant a eu un pH relativement élevé dans la couche humifère et/ou à pénétration humifère du sol, par rapport aux autres segments topographiques. Cela serait dû au fait que ce segment topographique n'a pas beaucoup été sollicité pour les activités agricoles, à cause de la forte pente. L'augmentation du pH dans l'horizon de profondeur du bas de versant traduirait une évolution liée aux processus hydrodynamiques. En effet, au bas de versant, le colluvionnement se traduit par des apports épisodiques d'éléments sableux, renfermant des éléments colloïdaux. Ces éléments sont moins acides que les horizons de surface. Un résultat similaire a été obtenu dans les sols au Sud du bassin arachidier du Sénégal (Sow, 1999).

La différence entre le pH_{KCl} et le pH_{H_2O} (ΔpH ou acidité résiduelle) montre une sensibilité des sols à l'acidification. Les valeurs de ΔpH , obtenues dans les sols, indiquent que l'acidité d'échange représente une part importante de la garniture

cationique du complexe adsorbant. Ce qui conduit à un complexe adsorbant désaturé tel qu'obtenu dans la présente étude. En effet, dans des conditions d'acidité moyenne ($\text{pH} \geq 5,0$), la charge nette des colloïdes minéraux de type 1/1 (kaolinite), même si faible, est encore négative (Menzies, 2003). Or, les sols dérivés de matériaux volcanosédimentaire de Côte d'Ivoire sont caractérisés par une abondance de kaolinite (Yoboué *et al.*, 2010), ce qui expliquerait les valeurs de ΔpH . Selon Duchaufour (1977), ce fait révèle l'absence de minéraux argileux à hautes charges permanentes, de type vermiculites, smectites ou halloysite. Ce résultat est contraire à celui de Quantin *et al.* (2007), obtenu sur les Cambisols dérivés de matériaux volcaniques.

Les Cambisols manganésifères apparaissent relativement déficients en matière organique. En effet, les teneurs en carbone organique des sols étudiés ont été relativement faibles par rapport aux normes établies par Landon (1991). La matière organique, en raison de sa faible teneur dans les sols étudiés, serait peu impliquée dans les processus d'échange cationique qui dépendent de la fraction minérale (Ben Hassine *et al.*, 2008). Selon Augusto *et al.* (2006), toute intervention tendant à influencer le stock de carbone organique, conduirait à des modifications des propriétés physico-chimiques des sols. Les teneurs de carbone organique, relativement élevées, ont été observées au bas versant, avec une répartition plus ou moins homogène dans le profil. Ce segment topographique (bas de versant) apparaît comme une zone d'accumulation des particules colluvionnées et alluvionnées. Les éléments sont arrachés aux autres segments topographiques (haut de versant et moyen versant) suite à la mise en culture des terres, par érosion, et se déposent, par séquences au bas versant. Ce qui entraîne des pertes en humus, notamment une baisse du taux de matière organique en amont (Piéri, 1989) et un enrichissement en aval (Tan *et al.*, 2004). Ce phénomène serait donc à l'origine de l'évolution verticale de la teneur des composés humiques dans les sols de bas versant. Un résultat similaire a été obtenu par Yao-Kouamé (2008a) sur les sols brunifiés (Cambisols) de Kanhankro (Toumodi) développés sur matériau volcanosédimentaire. La comparaison des teneurs en carbone organiques entre les sols manganésifères aux Etats Unis étudiés par Bourgault et Rabenhorst (2011) et ceux de notre étude, montre que les Cambisols manganésifères de Côte d'Ivoire sont mieux pourvus en carbone organique.

L'azote total est plus ou moins bien représenté dans les sols étudiés. Landon (1991) considère les teneurs supérieures ou égales à $1,3 \text{ mg.kg}^{-1}$ comme satisfaisantes dans les sols tropicaux. Dans le cas de nos travaux, les teneurs sont toutes supérieures à cette valeur dans les horizons de surface, quel que soit le niveau topographique et le site d'étude. L'azote total étant intimement lié au carbone organique (Dorel *et al.*, 2005), son évolution ou son comportement s'apparente à ce dernier dans les sols étudiés.

Le rapport entre ces deux éléments C/N est un indicateur de la qualité de la matière organique. Un rapport C/N moyen indique une bonne décomposition de la matière organique avec plusieurs conséquences, comme une disponibilité améliorée de l'azote pour les plantes, et une plus grande activité microbienne du sol (Genot *et al.*, 2009 ; Jandl *et al.*, 2012). Le rapport C/N dans les sols étudiés est moyen ($10 < \text{C/N} < 14$) dans les horizons humifères et/ou à pénétration humifères. Ces valeurs du rapport C/N traduisent une minéralisation plus ou moins normale, impliquant une bonne décomposition de la matière organique et une disponibilité en azote (Mallouhi, 1997). Le pH serait donc responsable de cette minéralisation, car, selon Elbering *et al.* (2003), l'acidification des sols, comme constaté dans le cas de cette étude, favoriserait la minéralisation rapide de la matière organique par une stimulation de l'activité biologique.

Les taux de carbone organique, dans l'horizon de surface, suivent une évolution décroissante, de Korhogo (site savanicole) à Guitry (site forestier), en passant par Bondoukou et Attiéguakro. En d'autres termes, les taux de matières organiques ont varié en fonction du climat. Plusieurs auteurs ont déjà observé que le stock de matière organique dans le sol serait influencé par divers facteurs de formation des sols, tels le climat (Ganuza et Almendros, 2003 ; Dai et Huang, 2006), la topographie (Burke, 1999), le matériau parental (Spain, 1990 ; Aranda *et al.*, 2011) et l'utilisation des terres (Sollins *et al.*, 1996). Il est généralement reconnu que parmi ces facteurs, le climat, notamment, la température et la pluviométrie, est le facteur le plus important dans la régulation des taux de matière organique (Callesen *et al.*, 2003 ; Dai and Huang, 2006, Ponge, 2011), car, il détermine le type de couvert végétal, la quantité et la qualité des

résidus organiques entrant dans le sol, ainsi que le degré de minéralisation ou de décomposition de la litière (Quideau *et al.*, 2001 ; Heviaa *et al.*, 2003).

Dans la présente étude, les taux de matière organique n'ont pas suivi une évolution associée au climat, telle que décrite par Ganuza et Almendros (2003), Lemenih et Itanna (2004) et Liu *et al.* (2011). Selon ces auteurs, le taux de matière organique augmente avec la précipitation, et décroît avec la température. Les taux de matière organique dans les sols manganifères seraient donc liés aux systèmes de cultures, puisque les fortes teneurs s'observent dans les zones à faible pluviométrie et à forte température (Korhogo), et les faibles teneurs sont constatées dans les zones à forte pluviométrie (Guitry). Ganuza et Almendros, (2003) rapportent que la capacité d'échange cationique (CEC) contrôle la teneur en carbone organique, en augmentant avec cette dernière. Cela est conforme à nos travaux, et expliquerait le gradient en carbone organique, puisque les valeurs de CEC sont fortes à Korhogo, et basses à Guitry. Les relations entre la capacité d'échange cationique et la matière organique ont aussi été observées par Bigorre *et al.* (2000).

Le rapport C/N est plus bas dans les horizons à Guitry par rapport aux autres sites (Korhogo, Bondoukou et Attiéguakro), impliquant une forte minéralisation de N à Guitry. Maithani *et al.* (1998), travaillant sur les sols subtropicaux d'Inde, ont mis en évidence l'influence du climat zonal sur le degré de minéralisation de l'azote. Selon ces auteurs, la forte pluviométrie, associée à la dense végétation, serait indispensable à une ambiance microbienne favorisant la décomposition rapide de la matière organique.

Le phosphore total est abondant dans les horizons de surface et tend à s'accumuler dans les sols de bas versant. Selon Mbonigaba *et al.* (2009), les teneurs en phosphore disponibles, inférieures à 20 mg.kg^{-1} de P_2O_5 , ont été considérées comme trop faibles pour assurer une nutrition phosphatée de la plupart des plantes. Les valeurs jugées faibles dans les sols étudiés ont été observées dans les couches de profondeur de sol, au haut de versant (H₃ et H₄, respectivement, $15,66$ et $10,6 \text{ mg.kg}^{-1}$). Hormis ces horizons, toutes les autres couches, tous niveaux topographiques confondus, présentent des teneurs en phosphore assimilable nettement supérieures à 20 mg.kg^{-1} de P_2O_5 . C'est dire donc que les sols étudiés ont des valeurs relativement acceptables en phosphore, vu l'importance du phosphore dans le cycle sol-plantes (Kainer *et al.*,

2007). Les teneurs moyennes seraient liées à la réaction acide des sols, qui favorise une solubilité des ions phosphates et augmente la part active du phosphore. La baisse des teneurs en phosphore assimilable avec la profondeur tient à la diminution de la teneur en matière organique. Aussi, pensons-nous que les concentrations en phosphore dans les sols de bas versant, comme d'ailleurs dans ceux de moyen versant, sont liées à la présence des cations de fer et non à des processus de drainage, comme constaté par Quesada *et al.* (2010).

Au niveau des sites d'études, les teneurs de P ass. à Guitry ont été plus faibles par rapport aux autres sites, malgré de fortes valeurs de P total. A de faibles pH, les oxydes de Fe et de Al et leurs hydroxydes réagissent avec le phosphore disponible et forment des complexes insolubles, telles la variscite et la strengite (Moyin-Jesu, 2008). La formation de ces complexes va réduire la quantité de P ass. dans les sols. Ce processus pourrait être responsable des faibles teneurs en P ass. à Guitry. Turner et Haygarth (2001) ont observé que les cycles de dessiccation et d'humectation des sols peuvent entraîner une libération de P en solution suite à la destruction de cellules microbiennes. Cela expliquerait les fortes valeurs de P ass. observées à Korhogo, Bondoukou et Attiégouakro.

Les valeurs moyennes de Ca^{2+} dans ces sols, comprises entre 0,48 et 2,33 cmol.kg^{-1} , sont jugées faibles par Landon (1991). Selon cet auteur, les déficiences en calcium échangeable dans les sols surviennent normalement à de faibles CEC, à $\text{pH} \leq 5$; ce qui correspond à nos résultats, puisque les pH sont, dans la plupart des cas, inférieurs à 5,5.

Les valeurs de Mg^{2+} sont nettement supérieures à 0,5 cmol.kg^{-1} dans les horizons de surface, seuil de déficience en magnésium pour les sols tropicaux (Mbonigaba, 2009). Les teneurs en K^+ sont, quant à elles, acceptables dans l'horizon de surface ; ce qui est favorable pour l'agriculture, car, selon Römheld et Kirkby (2010), le potassium disponible pour les plantes est généralement situé dans la couche humifère et à pénétration humifère du sol. Ces taux, plus ou moins élevés, de Mg^{2+} et de K^+ pourraient résulter de la présence de quantités raisonnables de Mg^{2+} et de K^+ , provenant de l'altération de minéraux primaires porteurs de Mg et de K tels la biotite ($\text{K}(\text{Mg,Fe})_3 (\text{AlSiO}_{10}) (\text{OH})_2$) et la muscovite ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}) (\text{OH})_2$), l'orthose et la

microcline (KAlSi_3O_8) (Mustapha, 2007) ; la chlorite ($(\text{FeMgAl})_6(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) et le feldspath (Marques *et al.*, 2002). Ces résultats sont similaires à ceux de Nangah *et al.* (2012).

Un transfert vertical et oblique des bases échangeables est traduit par l'accumulation de ceux-ci dans les horizons de profondeur et au bas versant. Selon Yeboua et Ballo (2000), la lixiviation des bases serait en relation avec la pluviométrie, la perméabilité, la forte baisse du pouvoir adsorbant et la densité du système racinaire.

La capacité d'échange cationique (CEC) de ces sols est jugée faible selon Martin et Nollin (1991), et ne présente aucune différence significative selon les niveaux topographiques. La CEC reflète, en réalité, la taille du réservoir du sol en éléments nutritifs chargés positivement, qui dépend, principalement, de la texture du sol, et, plus particulièrement, de sa teneur en argile, ainsi que de la nature de la MO (Masmoudi *et al.*, 2011). Les faibles valeurs de CEC pourraient donc résulter des faibles quantités de matière organique et de la présence d'argile telles la kaolinite et l'illite. En effet, ces deux types d'argile semblent les plus nombreux dans les sols de Côte d'Ivoire issus de matériaux volcano-sédimentaires (Yoboué *et al.*, 2010).

Les taux de saturation en bases, compris entre 8 et 43 %, rangeraient ces sols dans la classe des sols oligosaturés à désaturés ou dystriques (WRB, 2006).

L'influence du climat de la zone d'étude présente une différence significative dans la plupart des horizons de sol pour les bases échangeables. Les valeurs les plus fortes s'observent à Guitry, en climat attiéen. La différence significative peut probablement être attribuée aux mêmes processus que ceux décrits par Chauvel *et al.* (1986), Lucas *et al.* (1993). Selon ces auteurs, les teneurs relativement élevées en cations basiques seraient dues aux retombées des feuilles en forêt, qui contribueraient à recycler les cations dans la partie supérieure du sol.

L'évolution similaire de la capacité d'échange cationique et de la matière organique en fonction de la zone d'étude, laisse supposer une forte contribution de la matière organique à la CEC, comme observé par Ben Hassine *et al.* (2008).

Les études de corrélations réalisées nous permettent de mentionner la grande complexité des phénomènes chimiques dans les sols manganésifères. En effet, certaines corrélations caractérisent l'ensemble des sites et d'autres les individualisent.

Les corrélations entre différentes bases échangeables, celles avec leur somme et la CEC tiennent au fait que, dans les conditions locales, où la majeure partie du complexe adsorbant vient de la matière organique, les sols riches en une base donnée, le sont également en une autre. Certaines relations entre les propriétés physico-chimiques établies dans chaque zone d'étude viennent accentuer les disparités zonales entre les différents sites étudiés, bien que les sols et les roches mères soient identiques.

Les sols de Guitry apparaissent plus enrichis en bases échangeables, avec des taux de saturation en bases plus élevés par rapport aux autres sites d'étude. Nous partons des sols oligosaturés à Guitry vers les sols fortement désaturés à Korhogo. Néanmoins, tous ces sols appartiennent aux sols dystriques (WRB, 2006), à cause de leur taux de saturation en bases inférieur ou égale à 50 %.

L'analyse factorielle fait ressortir que le facteur 1, qui met en évidence des éléments du complexe adsorbant (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , S et V) pourrait être considérée comme étant celui de la lixiviation des bases. Le facteur 2 pourrait être considéré comme l'expression de la fertilité organique ou de la décomposition de la matière organique des sols, car il met en relief les éléments tels C, N et MO. L'axe factoriel 3, discrimine les éléments comme le $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, le pH_{KCl} et l'acidité due aux ions H^+ . Ce facteur pourrait être considéré comme étant lié à l'acidification des sols. L'axe factoriel 4 qui met en évidence C/N, Ptotal, Pass, Ca^{2+} , Na^+ pourrait être défini comme étant l'axe de la minéralisation. L'axe factoriel F6 qui discrimine les argiles et les sables, pourrait être considéré comme le facteur de variation texturale des sols ou axe granulométrique.

Les processus majeurs dans ces sols ont été identifiés et hiérarchisés selon leur ordre d'importance. Ainsi, la lixiviation est le processus majeur dans les Cambisols manganifères de Côte d'Ivoire. La décomposition de la matière organique, la fertilité tant minérale et qu'organique sont les processus dominants dans les sols étudiés, l'acidification étant un processus secondaire.

6-2 Distribution des ETM dans les sols manganésifères

Les concentrations en ETM observées dans les sols manganésifères des zones volcano-sédimentaires étudiés sont élevées, comme dans les sols issus de matériaux volcaniques, basaltiques, décrits par Soubrand-Colin (2004) en France, Many et Maboko (2008) en Tanzanie, Brandt *et al.* (2009) en Russie, Guo *et al.* (2009) au centre de la Mongolie, Raza *et al.* (2009) dans le North de l'Inde, Mendoza-Rosales *et al.* (2010) au Mexique, et, plus spécifiquement, de matériaux volcano-sédimentaires décrits par Strieder *et al.* (2000) au Brésil ; Bennoua *et al.* (2004) au Maroc.

Parmi les teneurs en ETM des sols, seules celles de Pb, Cr, Ni et Co semblent habituellement observées dans la plupart des sols du monde. Les teneurs en Cu, Zn, Cd et Mn se situent, toutes, dans la zone des teneurs critiques pour les sols, pouvant entraîner des phénomènes de toxicité (Fageria *et al.*, 2002 ; Colinet, 2003). Ces auteurs situent les teneurs critiques dans les sols, pour Mn, entre 1000 et 3000 mg.kg⁻¹, pour Cu, entre 60 et 125 mg.kg⁻¹, pour Zn, entre 100 et 250 mg.kg⁻¹, pour Cd, entre 0,7 et 2 mg.kg⁻¹.

Certains ETM, à savoir : Fe, Ni et Co présentent des coefficients de variation relativement faibles (< 25%). Benson (2006) indique que les ETM à faible coefficient de variation ont une mobilité potentielle relativement faible. A l'opposé, les ETM tels que Mn, Cd, Zn, Pb, Cr et Cu sont variables. Cela montre leur faible rétention dans le sol, ce qui les rendrait plus labiles et biodisponibles (Alloway, 1990). L'analyse statistique a montré que la plupart des ETM sont intercorrélés, linéairement, de façon significative, ce qui pourrait suggérer que ces ETM coexistent en tant que constituants de minéraux dans les sols, rejoignant en cela les résultats obtenus par Tabatabai et Rogovska (2011), Nangah *et al.* (2013).

Dans cette étude, le facteur « drainage latéral » ne s'est pas avéré déterminant dans la différenciation des éléments, du fait de la non existence d'un gradient topographique bien marqué d'amont en aval. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les processus de formation des sols restent équilibrés dans cet environnement, car les sols ont été formés à partir du même matériau parental (formation volcano-sédimentaire). Ce résultat est en accord avec celui obtenu par Colinet (2003) et Voncir *et al.* (2008). Les différences de concentrations observées entre les segments

topographiques et les différents horizons d'accumulation des ETM dans les sols seraient attribuées à une influence des processus pédologiques combinés entre eux dans les sols manganésifères. Les concentrations de certains ETM au niveau du bas de versant ont été expliquées par plusieurs travaux (Quantin *et al.*, 2001 ; 2002). Leurs travaux ont montré que la libération de Mn (avec de petites quantités de Co et Ni), à partir d'oxydes de Mn, et, dans une moindre mesure, la libération de Ni et Cr, à partir d'oxydes de Fe par des Ferri bactéries réductrices, dans des conditions détrempées, doit être considérée comme la comptabilité principale des processus pour la mobilisation de Mn, Co et Ni dans la partie inférieure de la toposéquence.

Au niveau du profil, la pédogenèse a impliqué des redistributions des composants du sol (carbonates, argiles, oxydes, matières organiques), qui ont souvent été gouvernées par l'infiltration de l'eau dans le sol (Legros, 2007). Les particules lessivées ont eu tendance à se redéposer à la base du profil, aboutissant à des couches de sol aux propriétés modifiées. La lixiviation a aussi conduit à l'appauvrissement en ETM des horizons de surface. En effet, la lame d'eau traversant les profils de sol a la capacité de mettre en solution les éléments les plus labiles, et de les entraîner en profondeur (Sparks, 2003). Le départ des métaux en surface peut être compensé par leur accumulation partielle, plus en aval, dans le profil. Ces 2 phénomènes (lessivage et lixiviation) pourraient être responsables, de la répartition selon la profondeur, du sol de Ni, Pb, Co et Cu au haut versant, de Ni et Pb au moyen versant et de Cr et Co au bas versant. De la même manière, la répartition de Cr, Co, Cu, Cd et Mn à Korhogo, de Pb, Cu et Mn à Bondoukou, de Cr, Pb, Cd et Cu à Attiégouakro, de Ni, Cr, Pb, Cu, Zn, Mn et Fe à Guitry pourrait être influencée par le lessivage associé à la lixiviation. L'intensité de ces phénomènes est particulièrement marquée à Guitry, car plusieurs ETM se sont accumulés en profondeur (Ni, Cr, Pb, Cu, Zn, Mn et Fe) du fait de la forte pluviométrie. Les horizons d'accumulation des ETM ont été les horizons riches en argile. En effet, la charge de surface des couches argileuses est composée d'une part, des charges permanentes dues à des substitutions isomorphiques dans les feuillets et d'autre part, des charges variables ayant pour origine la présence de groupements hydroxyles en bordure des argiles sur les sites de type silanols (-SiOH) et aluminols (-

AlOH) (Citeau, 2004). Les charges permanentes confèrent à l'ensemble du feuillet une charge négative et créent des sites d'échange avec les cations en solution.

Baize (1997) a montré que les concentrations en ETM d'un sol subissant la lixiviation et le lessivage doivent croître avec la profondeur, au moins jusqu'à l'horizon d'accumulation. L'importance du lessivage et de la lixiviation dans la dynamique des ETM, comme constatée dans les sols manganésifères, a été rapportée par plusieurs auteurs travaillant sur divers types de sol (Dère, 2006 ; Arby *et al.*, 2010).

En faisant intervenir la notion de roche mère, Baize (1997) a signalé que les concentrations observées au niveau des horizons les plus profonds reflètent les occurrences naturelles des ETM dans les sols. Ainsi, les profils décroissants de la base à la surface indiquent une source majoritairement naturelle, provenant, de l'altération du matériau parental. L'accumulation de certains ETM en surface a été constatée dans certaines zones étudiées, sans que l'on puisse parler de contamination, rejoignant les observations de Kouakou *et al.*(2013). Il s'agit de Ni, Zn, Pb et Fe à Korhogo ; de Ni, Cr, Zn, Fe, Cd et Co à Bondoukou ; de Ni, Co, Mn et Fe à Attiéougakro, de Co à Guitry. En revanche, les plus fortes concentrations dans les horizons de surface traduisent l'affinité des ETM pour le carbone présent dans les horizons de surface (Citeau, 2004 ; Gaudois, 2009). En effet, la charge des substances humiques est toujours négative ou nulle, d'intensité variable, suivant le pH du milieu et provient de la dissociation des groupements fonctionnels (Citeau, 2004). Ce sont donc ces groupements fonctionnels carboxyliques (COOH), phénoliques et/ou alcooliques (OH), carbonyles (C=O) et amines (NH₂) qui sont fortement impliqués dans la complexation des cations métalliques. Cela pourrait, en partie, expliquer la dynamique des ETM des sols étudiés. Cette dynamique serait influencée par plusieurs processus interagissant dans les sols manganésifères issus de matériaux volcano-sédimentaires. La dynamique verticale des ETM reste très variable, selon la zone et la position topographique.

Les ETM observés sont d'origine pédogénétique. Néanmoins, quelques contaminations ont été observées pour Pb, à Korhogo, et pour Cd, à Bondoukou, après

calcul des facteurs d'enrichissement. Ces contaminations, attribuées aux activités agricoles (Ross, 1994), restent négligeables.

L'exploitation des résultats de l'horizon 0-60 cm montre l'existence d'un gradient d'accumulation croissant, Nord-Sud, prononcé pour Cd. L'inverse est observé pour Zn. Mn est plus abondant à Guitry et à Attiégouakro, mais faible à Bondoukou. Le Chrome apparaît plus important à Bondoukou. Les plus fortes teneurs en Fe ont été observées à Attiégouakro. Les autres ETM (Ni, Cu, Pb et Co) restent plus ou moins homogènes dans les différentes zones étudiées.

Les équations reliant les teneurs en ETM aux paramètres physico-chimiques des sols sont variables en fonction de la zone étudiée. La variabilité des zones étudiées entraîne une divergence dans les éléments physico-chimiques responsables de l'accumulation de ces ETM, et aussi une diversité des ETM exprimés. Cette variabilité dans la distribution des ETM en fonction des caractéristiques du sol pourraient être attribués au couvert végétal. En effet, le couvert végétal joue un rôle important dans les cycles biogéochimiques des éléments chimiques du sol (Watmough *et al.*, 2005).

Les différentes caractéristiques du sol tels que le pH du sol, la quantité de MO, la CEC, la quantité de phosphore et les fractions granulométriques, obtiennent, en général, les meilleurs équations de prédiction des ETM dans les sols (Francois *et al.*, 2004 ; Watmough *et al.*, 2005 ; Luo *et al.*, 2006). Ces caractéristiques interviennent de manière différente dans les zones d'étude.

Ainsi, à Korhogo, le limon exprime mieux les concentrations de Mn, le pH se voit expressif de Cd. L'affinité de Cd pour le pH a été rapportée par plusieurs auteurs (Watmough *et al.*, 2005 ; Luo *et al.*, 2006). A Bondoukou, c'est l'argile qui prédit Pb ; la CEC est expressive de Zn. Boyle et Fuller (1987) indiquent que la CEC est l'un des principaux facteurs impliqués dans la rétention de Zn dans un sol. A Attiégouakro, c'est la CEC qui a été plus expressive de Pb. A Guitry, par contre, l'expression des teneurs totales en zinc est manifestée par la matière organique. La réactivité de Zn vis-à-vis du carbone (Dère, 2006) a été importante à Guitry.

A coté de ceux-ci, d'autres éléments tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , N, la somme des bases échangeables et le taux de saturation en bases sont apparus, dans ce travail, comme des régresseurs dont il faudra tenir compte dans la modélisation des ETM.

Les zones étudiées sont donc des zones agricoles à teneurs excessives en Mn, Fe, Cu, Zn. Ce qui pourrait les prédisposer dans certaines conditions à des risques de toxicité et constituer une réelle préoccupation pour la production végétale, la qualité des eaux souterraines et l'homme, à cause des pH franchement acides de ces sols. Des observations similaires ont été faites, notamment pour Mn, Ni et Co dans les sols manganésifères en Amérique (Bourgault et Rabenhorst, 2011) et pour Ni, Co, Zn, Cu, et Pb dans les sols manganésifères d'Afriques du Sud (Dowding et Fey, 2007).

6-3 Cartographie des sols par télédétection

La démarche suivie a permis la caractérisation radiométrique des unités de surface, en relation avec les unités géopédologiques auxquelles elles sont associées tel que réalisé par Mane *et al* (2001).

Il a été observé une diminution de la qualité de la classification avec la précision globale en partant du Nord vers le Sud de la Côte d'Ivoire. Si les résultats obtenus pour les zones de Korhogo (97,88 %), de Bondoukou (91,07 %) et d'Attégouakro (91,06 %) sont au dessus du seuil recommandé de 85 % de pixels bien classés, pour une classification acceptable (Foody, 2002), il passe légèrement en dessous de ce seuil dans la zone de Guitry. Mais, l'indice de kappa, dans cette zone (Guitry), étant supérieur à 70 %, la classification est donc acceptable selon les travaux de Chalifoux *et al.* (2006). Ces résultats globaux masquent cependant d'importantes disparités entre les classes. En analysant les résultats de la matrice classe par classe, il a été remarqué que les imprécisions moyennes se situent dans la zone de Bondoukou pour les classes « Cambisols (Dystric) » et « Plinthic Cambisols (Dystric) ». Les plus fortes imprécisions se situent, par contre, dans la zone de Guitry, pour la classe « Plinthic Cambisols (Dystric) ». Ces imprécisions seraient probablement dues à la végétation et, aussi, à la classification des sols. En effet les sols appartenant tous à la même classe (Cambisols), la différenciation est alors basée sur les sous classes, qui sont difficilement différenciées sur le terrain. La classe « cuirasse et/ou affleurement rocheux n'a pas été observée à Guitry. Ce fait serait dû à l'altération poussée dans cette zone, du fait de la forte pluviométrie.

L'apport des indices radiométriques (Indice de végétation (NDVI), indice de brillance (IB) et indice de couleur (IC)) dans la cartographie des sols manganésifères, a montré des résultats significatifs pour cette étude, notamment dans les zones où la végétation est moins dense, comme ce fut le cas dans la caractérisation des états de surface des sols (Abderrazak, 2003 ; Bahri *et al.*, 2012 ; Bannari *et al.*, 2007). Lamachère et Puech (1995), travaillant au Centre du Burkina Faso, ont trouvé de bons résultats en utilisant ces indices (NDVI, IB et IC) pour la cartographie des sols. De façon générale, l'indice de précision globale et l'indice de kappa sont décroissants en partant de Korhogo à Guitry. Ce qui signifie que la classification, dans la zone de Guitry, est moins bonne que celle de la zone de Korhogo. Toutefois, ces indices témoignent d'une bonne classification dans l'ensemble.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSION

L'étude réalisée sur les sols manganésifères, du Nord au Sud de la Côte d'Ivoire, permet de relever un certain nombre de conclusions, en réponse aux principaux objectifs évoqués en introduction et ici rappelés, à savoir :

- caractériser les traits morphologiques des Cambisols manganésifères ;
- déterminer les propriétés physico-chimiques fondamentales des sols manganésifères issus de matériau volcano-sédimentaire, afin de faire ressortir les grands traits physico-chimiques ;
- déterminer la distribution des éléments traces métalliques dans les sols manganésifères;
- évaluer les relations entre les caractéristiques physico-chimiques et les éléments traces dans les sols manganésifères ;
- apprécier la spatialisation des sols manganésifères à l'aide de la télédétection.

La caractérisation morphologique des Cambisols manganésifères fait apparaître la prédominance des teintes 2,5YR, 5YR, 7,5YR et 10YR, avec des valeurs de chroma et de valeur identifiées, respectivement, de 3 à 4 et de 2 à 4. L'abondance des éléments grossiers (> 30 %) confirme bien la prépondérance du processus de remaniement. Ce sont des sols dont la structure est essentiellement polyédrique subanguleuse, avec des textures majoritairement fines (argileuses, limono-argileuse et limoneuses).

Au vu des valeurs de l'acidité, ces sols se rangent dans la classe des sols acides. Nous pouvons dire que l'on se trouve dans les situations où des phénomènes de toxicité seraient susceptibles de s'exprimer. De façon générale, des déficiences en matière organique sont observées pour ces sols, par contre, l'azote et le phosphore sont mieux représentés. Du point de vue des cations basiques, l'on observe une déficience en Ca^{2+} dans ces sols, pourtant bien pourvus en K^+ et Mg^{2+} .

L'étude des différentes zones concernées (Guitry, Attiéguakro, Bondoukou et Korhogo) met en évidence l'importance :

- de la lixiviation, quelle que soit l'intensité de ce processus, la dynamique verticale de la plupart des éléments est conditionnée par la présence d'un horizon d'accumulation, généralement l'horizon H₃ ;
- de la fertilité organique et de la minéralisation, favorisant la disponibilité en éléments nutritifs ;
- de l'acidification des sols ;
- de la variation texturale.

L'analyse toposéquentielle a permis de constater que les paysages observés fonctionnent comme des milieux ouverts, avec des gradients physico-chimiques, d'amont en aval. Ces gradients ont été observés aussi bien pour les caractères morphologiques que pour les caractères chimiques. Le facteur drainage latéral a été déterminant dans la différenciation des caractères physico-chimiques des sols. Les positions de bas de versant se comportent comme des zones de concentration en éléments nutritifs, au détriment des autres niveaux topographiques.

La comparaison des zones d'étude a mis en exergue l'existence d'un gradient bien marqué pour la matière organique et la CEC. Ces éléments suivent une évolution décroissante, du Nord (zone savanicole) au Sud (zone forestière). La zone forestière (Guitry) demeure mieux enrichie en bases par rapport aux autres zones étudiées. L'influence des conditions microclimatiques sur la pédogenèse est importante dans l'individualisation des Cambisols jugés désaturés, de par la faiblesse de leur taux de saturation en bases.

Il ressort que les stocks relativement faibles en carbone organique et la mauvaise qualité de matière organique, les faibles niveaux de pH et le déséquilibre cationique, pourraient constituer de graves contraintes à la production agricole, si des itinéraires techniques appropriés ne sont pas adoptés, tel le relèvement du pH, qui créerait de meilleures conditions favorables à la libération des autres éléments chimiques. Le rehaussement du pH de ces sols devra être envisagé en vue d'une bonne libération des éléments chimiques et une augmentation des rendements. Toutefois, il faudra tenir compte des disparités régionales pour l'utilisation de techniques adaptées.

Les roches volcano-sédimentaires étudiées contiennent, naturellement, des teneurs importantes en éléments traces métalliques (ETM). Dans ce contexte, les sols

qui se développent sur ce type de substrat présentent également de fortes teneurs en ETM. L'ordre d'abondance de ces éléments est : $Fe > Mn > Cu > Zn > Cr > Ni > Pb > Co > Cd$ à l'exception de Korhogo où $Ni > Cr$. Parmi les teneurs en ETM obtenues dans ces sols, seules celles de Pb, Cr, Ni et Co présentent des teneurs habituelles. Les teneurs en Cu, Zn, Cd, Mn et Fe se situent dans la gamme des teneurs critiques dans les sols, pouvant entraîner, dans certains cas, des phénomènes de toxicité. Ces ETM coexistent en tant que constituants minéraux des sols, et leur dynamique verticale est très variable selon la zone ou la position topographique, mais, le facteur drainage latéral ne s'est pas avéré déterminant pour la différenciation des ETM dans les sols.

L'accumulation de certains ETM a été constatée dans quelques zones étudiées, sans que l'on puisse parler de contamination ; c'est le cas de Ni, Zn et Mn à Korhogo ; de Ni, Cr et Co à Bondoukou ; de Cr et Co à Guîtres. Par ailleurs, les contaminations de Pb à Korhogo, et de Cd à Bondoukou, ne sont pas à des niveaux critiques.

L'exploitation des résultats de l'horizon 0-60cm montre l'existence d'un gradient (croissant) Nord-Sud, d'accumulation marqué pour Cd. L'inverse est observé pour Zn. Mn est plus abondant à Guîtres, mais, faible à Bondoukou. Cr apparaît plus important à Bondoukou. Les autres ETM (Fe, Ni, Cu, Pb et Co) restent plus ou moins homogènes dans les différentes zones étudiées.

Les équations reliant les ETM aux teneurs des paramètres physico-chimiques des sols varient en fonction de la zone étudiée. La variabilité des zones étudiées a entraîné une variabilité dans les éléments physicochimiques responsables de la mobilité de ces ETM. Les diverses caractéristiques des sols tels que le pH du sol, la quantité de matière organique, la CEC, la quantité de P et les fractions granulométriques interviennent de manière différente dans les zones d'étude. Ainsi, à Korhogo, le limon exprime mieux les concentrations de Mn et le pH est expressif de Cd. A Bondoukou, c'est l'argile qui prédit Pb, la CEC est expressif de Zn. A Guîtres, l'expression des teneurs totales en zinc est manifestée par la matière organique.

Les zones étudiées sont des zones agricoles à teneurs élevées en Mn, Fe, Cu, Zn. Cela pourrait entraîner dans certains cas un risque de toxicité pour les plantes et pour l'homme, notamment à cause des pH qui sont acides dans ces sols. C'est

pourquoi, tout projet fertilisation et/ou d'amendement devra être en relation avec les teneurs en ETM dans les sols et les pH.

L'utilisation des indices radiométriques a montré de bons résultats dans la cartographie des sols manganésifères, surtout dans les zones à faible couverture végétale. Les classes obtenues sont les Cambisols (Manganiferric, Dystric), les Cambisols (Dystric), les Endogleyic Cambisols (Dystric); les Cuirasses et/ou affleurements rocheux et les Plinthic Cambisols (Dystric).

PERSPECTIVES

Un prolongement de cette étude serait la spatialisation des ETM, afin de déterminer leur étendue précise pour une gestion appropriée. La prise en compte des oxydes et oxyhydroxydes, à travers une étude minéralogique poussée, pourrait aider à l'approfondissement des notions relatives à l'accumulation des ETM et des processus pédogénétiques dans les sols.

D'autres aspects, non abordés dans ce travail, permettraient de préciser les risques environnementaux et agricoles, susceptibles d'être induits par la présence de ces ETM. Il s'agit, entre autre, de la spéciation des ETM, pour mieux appréhender les phénomènes de leur mobilité dans les sols ; la phytodisponibilité à travers la mise en place d'essais agronomiques sur les différents sites.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abderrazak B., 2003. Les indicateurs radiométriques pour l'étude de la dynamique des écosystèmes arides (région de Zougrata, Sud-Est tunisien). *Sécheresse*, 14 (4) : 267-274.

Adjanohoun F., 1964. Quelques considérations écologiques sur les limites forêt-savane en Côte d'Ivoire. Comm. Symposium (Venezuela), 6 p.

Agusto L., Badeau V., Arrouays D., Trichet P., Flot J. L., Jolivet C. et Merzereau D., 2006. Caractérisation physico-chimique des sols d'une région naturelle à partir d'une compilation de données : exemple des sols du massif forestier landais. *Etudes et Gestion des Sols*, 13 (1) : 07-22.

Albergel J., 2007. Le nord de la Côte d'Ivoire, un milieu approprié aux aménagements de petite et moyenne hydraulique. In : Cecchi P., Lévêque C., Aubertin C. (Eds) : L'eau en partage : les petits barrages de Côte d'Ivoire. IRD, Paris : 45-57.

Alloway B J., 1990. Heavy metals in soils. Ed. Blackie Academic & Professional, Glasgow, 339 p.

Alric G., 1990. Géochimie du volcanisme birrimien (protérozoïque inférieur) de l'unité de haute-comoé, NE de la Côte d'Ivoire : premiers résultats. *Journal of African Earth Sciences*, 10 (4) : 669-681.

Amini M., Afyuni M., Fathianpour N., Khademi H. et Fluhler H., 2005. Continuous soil pollution using fuzzy logic and spatial interpolations. *Geoderma*, 124 : 223-233.

Anonyme, 2003. Etude relative à l'élaboration d'un plan de développement de l'irrigation : phase 1. MINAGRA, 1, 156 p.

Aranda V., Ayora-Cañada M. J., Dominguez-Vidal A., Martin-Garcia J. M., Calero J., Delgado R., Verdejo T. et González-Vila F. J., 2011. Effect of soil type and management (organic vs. conventional) on soil organic matter quality in olive

groves in a semi-arid environment in Sierra Magina Natural Park (Spain). *Geoderma*, 164 : 54-63.

Arby Z. O., Dekayir A. et El Maataoui M., 2010. Vertical Dynamics of the Trace Elements (TE) in Cultivated Soils Subject to an Application by the Sewage (Ourzirha, Meknes-Morocco). *European Journal of Scientific Research*, 43 (2) : 221-229.

Aubert D., Stille P. et Probst A., 2001. REE fractionation during granite weathering and removal by waters and suspended loads: Sr and Nd isotopic evidence. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 65 : 387-406.

Avenard J. M., 1971. Aspects de la géomorphologie. In : Avenard J.-M., Eldin M., Girard G., Sircoulon J., Touchebeuf P., Guillaumet J.-L., Adjanohoun E. et Perraud A. (Eds) : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. ORSTOM, Paris : 7-72.

Bahri E., Haboudane D., Sabir M., Chilasse L. et Chikhaoui M., 2012. Caractérisation de l'état de dégradation des sols du bassin versant de Zagota (Maroc) à l'aide d'indicateurs spectraux. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 1 : 59-62.

Baize D., 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols français. Références et Stratégies d'interprétation. Ed. INRA, Paris, 410 p.

Baize, D., 2000. Guide des analyses en pédologie. Ed. INRA, Paris, 257 p.

Bannari A., EL-Harti A, Haboudane D, Bachaoui E-M. et EL-Ghmari A., 2007. Intégration des variables spectrales et géomorphométriques dans un SIG pour la cartographie des aires exposées à l'érosion. *Revue Télédétection*, 7 : 27-342

Bassett T., 2002. Le Coton des paysans. Une révolution agricole (Côte d'Ivoire 1880-1999). Ed. IRD, Paris, 291 p.

Bech B. J., Cardus J., Lasala M., Lamouroux M., Quantin P. et Segalen P., 1983. Etude de sols bruns formés sur arènes granitiques de la bordure septentrionale de la Sierra de Prades (Tarragone, Espagne). *Cah. ORSTOM.*, ser.Pedol., 10 (1) : 63-71.

Bech B. J., Bouleau A., Cardus J., Lasala M., Lamouroux M., Quantin P. et Segalen P., 1985. Etude de deux sols formés sur roches volcaniques dans la Selva (Catalogne, Espagne). *Cah.ORSTOM.*, ser.Pedol., 11 (1) : 79-95.

Ben Hassine H., Aloui T., Gallali T., Bouzid T., El Amri S. et Ben Hassen R., 2008. Evaluation quantitative et rôle de la matière organique dans les sols cultivés en zones subhumides et semi-arides méditerranéennes de la Tunisie. *Agrosolutions*, 19 (2) : 4-17.

Bennoua A., Ben Abbou M., Hoepffner C., Ribeiro M. L., Kharbouch F., Ramos J. F., Youbi N., Driouch Y., Dahire M. et Ntarmouchant A., 2004. New observation on the carboniferous volcano-sedimentary depocentre of the Tazekka (middle-atlas, Morocco): implications for understanding of the geodynamic evolution of the hermicynian belt. *Comunicações Geológicas*, 91 : 45-60.

Benson N. U., 2006. Lead, Nickel, Vanadium, Cobalt, Copper and Manganese distribution in intensively cultivated floodplain Ultisol of cross river, Nigeria. *International Journal of Soil Science*, 1 (2) : 140-145.

Bigorre F., Tessier D. et Pedro G., 2000. Contribution des argiles et des matières organiques a la rétention de l'eau dans les sols. Signification et rôle fondamental de la capacité d'échange en cations. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 330 : 245-250.

Bliefert C. et Perraud R., 2001. Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets. Ed. De Boeck, Paris, 478 p.

Boher M., Abouchamy W., Michard A., Albarède F. et Arndt N.T., 1992. Crustal growth in West Africa at 2.1 Ga. *Journal of Geophysical Research*, 97 : 345 - 369.

Boulet R., Chauvel A., Humbel F-X. et Lucas Y., 1982. Analyse structurale et cartographie en pédologie. I- Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique : les études de toposéquences et leurs principaux apports à la connaissance des sols. *Cahiers ORSTOM-Serie Pedologique*, 19 (4) : 309-321.

Bourgault R. R. et Rabenhorst M. C., 2011. Genesis and characterization of manganimiferous soils in the Eastern Piedmont, USA. *Geoderma*, 165 : 84–94.

Bourrelrier P-H. et Berthelin J., 1998. Contamination des sols par les éléments en trace : les risques et leur gestion. Ed. Lavoisier, Paris, 440 p.

Boyle M. et Fuller W. H., 1987. Effect of municipal solid waste leachate composition on zinc migration through soils. *Journal of Environmental Quality*, 16 (4) : 357-360.

Brady N. C. et Weil R. R., 2002. The nature and properties of soil. Ed. Prentice Hall Inc., New Jersey, 960 p.

Brandt N. S., Rasskazov S. V., Popov V. K. et Brandt S. B., 2009. Potassic Specifics of Basalts from the Sini Utes Depression: Geochemical Correlations and Problems of K–Ar Dating (Southern Primorye Region). *Russian Journal of Pacific Geology*, 3 (4) : 374-387.

Bremner J. M., 1996. Nitrogen-total. In : Sparks, D.L. (Ed.) : Methods of Soil Analysis : Chemical Methods, Part 3. Madison, Wisconsin : 1085-1122.

Brou T. Y., 2005. Climat, mutation socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Habilitation à diriger des recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, 226 p.

Buffle J., 1981. Complexation reactions in aquatic systems: an analytical approach. Ed. Ellis Horwood, Chichester, 692 p.

Bur T., 2008. Impact anthropique sur les éléments traces métalliques dans les sols agricoles de Midi-Pyrénées. Implications en termes de limites et de charges critiques. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, 281 p.

Burke I. C., 1999. Spatial variability of soil properties in the shortgrass steppe : the relative importance of topography, grazing, microsite and plant species in controlling spatial patterns. *Ecosystems*, 2 : 422-438.

Callesen I., Liski J. et Raulund-Rasmussen K., 2003. Soil carbon stores in Nordic well-drained forest soils-relationships with climate and texture class. *Global Change Biology*, 9 : 358-370.

Carré F., 2002. Cartogenèse des sols et changements d'échelle : application dans la région de la Rochelle sur une base de données pédologiques de plusieurs milliers d'observations. Thèses de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 399 p.

Chadwick O. A. et Chorover J., 2001. The chemistry of pedogenic thresholds. *Geoderma*, 100 : 321-353.

Chalifoux S., Nastev M., Lamontagne C., Latifovic R. et Fernandes R., 2006. Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire landsat en hydrogéologie. *Téledétection*, 6 (1) : 9-17.

Chauvel A., Lucas Y. et Boulet R., 1986. On the genesis of the soil mantle in the region of Manaus, Central Amazonia. *Experientia*, 43 (3) : 285-299.

Citeau L., 2004. Etude des colloïdes naturels présents dans les eaux gravitaires de sols contaminés : relation entre nature des colloïdes et réactivité vis-à-vis des métaux (Zn, Cd, Pb, Cu). Thèse de Doctorat, Institut National d'Agronomie Paris-Grignon, Paris, 236 p.

Colinet G., 2003. Eléments traces métalliques dans les sols: contribution à la connaissance des déterminants de leur distribution spatiale en région limoneuse Belge. Thèse de Doctorat, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques, Gembloux, 442 p.

Congalton R., Oderwald R. et Mead R., 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49 : 1671-1678.

Cornu S., 2005. Pédogenèse d'hier et d'aujourd'hui. Habilitation à diriger les recherches, Université d'Orléans, Orléans, 81 p.

CPCS (Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols), 1967. Classification des sols. ENSA Grignon, 87 p.

Dabin B., Leneuf N. et Riou G., 1960. Carte pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/2000000 : Secrétariat d'état à l'agriculture, notice explicative n°6, Direction des sols, Abidjan, 31 p.

Dahnke W. C. et Olson R. A., 1990. Soil test correlation, calibration and recommendation. In : Westerman R. L. (Eds). Soil testing and plant analysis. Madison WI : 45-71.

Dai W. et Huang Y., 2006. Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China. *Catena*, 65 : 87-94.

Davranche M. et Bollinger J-C., 2000. Heavy metals desorption from synthesized and natural iron and manganese oxyhydroxides : effect of reductive conditions. *Journal of Colloid & Interface Science*, 227 : 531-539.

Dère C., 2006. Mobilité et redistribution à long terme des éléments traces métalliques exogènes dans les sols : Application à des Luvisols pollués par 100 ans d'épandage d'eaux usées brutes dans la plaine de Pierrelaye. Thèse de Doctorat, Ecole National du Génie Rural des Eaux et Forêt, Paris, 124 p.

Díez Montes A., Martínez Catalán J. R. et Bellido Mulas F., 2010. Role of the Olla de Sapo massive felsic volcanism of NW Iberia in the Early Ordovician dynamics of northern Gondwana. *Gondwana Research*, 17 : 363-376.

Dixon J. B. et White G. N., 2002. Manganese oxides. In : Dixon, J. B., Schulze, D. G. (Eds) : Soil mineralogy with environmental applications. Madison, Wisconsin : 367-388.

Doelsch E., 2010. Etude du comportement des éléments majeurs et traces à l'interface eau-sol-plante : une approche multi-technique et multi-échelle. Habilitation à diriger les recherches, Université Aix Marseille, France, 105 p.

Dorel M., Lombard K. et Oliver R., 2005. Azote minéralisable et statut organique des Andosols de Guadeloupe. *Etude et Gestion des Sols*, 12 (4) : 267-280.

Dowding C. E. et Fey M. V., 2007. Morphological, chemical, and mineralogical properties of some manganese-rich oxisols derived from dolomite in Mpumalanga province, South Africa. *Geoderma*, 141 : 23-33.

Doumbia S., 1997. Géochimie, géochronologie et géologie structurale des formations birrimiennes de la région de Katiola – Marabadiassa : évolution magmatique et contexte géodynamique du paléoprotérozoïque. Thèse de Doctorat, Université d'Orleans, Orleans, 253 p.

Duchaufour P., 1977. Pédogenèse et classification. Eds. Masson, Paris, 477 p.

Duchaufour P., 1997. Abrégé de pédologie : Sol, Végétation, Environnement. Eds. Masson, Paris, 291 p.

Duffus J. H., 2002. “Heavy metals”- a meaningless term ? *Pure Applied Chemistry*, 74 (5) : 793-807.

Edou-Minko A., Mba S. E. et Eba F., 2003. L'état de fertilité du complexe absorbant des sols du plateau manganésifère d'Okouma (Gabon). *Revue CAMES - Série A*, 2 : 15 - 24.

Elbering B., Touré A. et Rasmussen K., 2003. Changes in soil organic matter following groundnut-millet cropping at three locations in semi-arid Senegal, West Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 96 : 37-47.

Fageria N. K., Baligar V. C. et Clark R. B., 2002. Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, 77 : 185-268.

Foody G. M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80 (1) : 185-201.

Foster J., Chittleborough D. J. et Barovich K., 2004. Genesis of a Terra Rossa soil over marble and the influence of a neighbouring texture contrast soil at Delamere,

South Australia. 3rd Australian New Zealand Soils Conference, 5–9 December 2004. University of Sydney, Australia : 1-8.
[http://www.regional.org.au/au/asssi/supersoil2004/s11/poster/1607_fosterj.htm]
(consulté le 01 janvier 2013).

Francois M., Dubourguier H-C., Li D. et Douay F., 2004. Prediction of heavy metal solubility in agricultural topsoils around two smelters by the physico-chemical parameters of the soils. *Aquatic Sciences*, 66 : 78-85.

Ganuza A. et Almendros G., 2003. Organic carbon storage in soils of the Basque Country (Spain) : the effect of climate, vegetation type and edaphic variables. *Biology and Fertility of soils*, 37 : 154-162.

Gaudois L., 2009. Dynamique et bilan des Eléments Traces Métalliques (ETM) dans des écosystèmes forestiers français Modélisation, Spéciation et Charges Critiques. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Toulouse, 245 p.

Gavalda D., 2001. Devenir des éléments traces métalliques dans les boubènes (Luvi-Redoxysol) après épandage de boues granulées. Thèse de Doctorat, INPT-ENSAT, Toulouse, 258 p.

Gee G. W. et Bauder J. W., 1986. Particle-size analysis. In : Klute A. (Ed.) : Methods of soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Madison, Wisconsin : 383-411.

Geerken R. et Ilaiwi M., 2004. Assessment of rangeland degradation and development of a strategy for rehabilitation. *Remote sensing of environment*, 90 : 490-504.

Genot V., Colinet G., Brahy V. et Bock L., 2009. L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne (adapté au chapitre 4-sol1) de « l'état de l'environnement wallon 2006-2007 ». *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 13 : 121-138.

Gerendas J., Polacco J. C., Freyermuth S. K. et Sattelmacher B., 1999. Significance of nickel for plant growth and metabolism. *Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences*, 162 : 241-256.

Girard M. C. et Girard C. M., 1999. Traitement des données de télédétection. Eds. Dunod, Paris, 529 p.

Gounou C., 2008. Mobilité des éléments traces métalliques dans les sédiments : couplage et comparaison des approches chimiques et microbiologiques. Thèse de Doctorat, Université Paris 12 - Val de Marne, Paris, 281 p.

Gourdin F., Cecchi P., Corbin D., Etienne J., Koné S. et Casenave A., 2007. Caractérisation hydrologique des petits barrages. In : Cecchi P., Lévêque C. et Aubertin C. (Eds) : L'eau en partage : les petits barrages de Côte d'Ivoire. IRD, Paris : 75-95.

Guo F., Fan W. M., Li C. W., Miao L. C. et Zhao L., 2009. Early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: Geochronological and geochemical evidence from the Dashizhai basalts, Inner Mongolia. *Science in China Series D : Earth Sciences*, 52 : 940-951.

Heviaa G. G., Bushiazzoa D. E. et Heppera E. N., 2003. Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effect of climate, soil texture and management. *Geoderma*, 116 : 265-277.

Hissler C. et Probst J., 2006. Impact of mercury atmospheric deposition on soils and streams in a mountainous catchment (Vosges, France) polluted by chlor-alkali industrial activity: the important trapping role of the organic matter. *Science of the Total Environment*, 361 : 163-178.

Hue N.V., Vega S., Silva J.A., 1999. Manganese toxicity in a Hawaiian Oxisol affected by soil pH and organic amendments. *Soil Sci. Soc Am. J.* 65 : 153-160.

Jamet R., 2000. Les sols de Moorea et des îles sous le vent : cartes à 1/40000 (Archipel de la société : Polynésie Française). Editions IRD, collection notice explicative n°113, Paris, 35 p.

Jandl R., Smidt S., Mutsch F., Fürst A., Zechmeister H., Bauer H. et Dirnböck T., 2012. Acidification and Nitrogen Eutrophication of Austrian Forest Soils. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012 : 1-9.

Jaradat Q. M., Massadeh A. M., Momani K. A. et Al Saleem M. A., 2010. The Spatial distribution of Pb, Cd, Zn, and Cu in Agricultural Roadside Soils. *Soil and Sediment Contamination*, 19 : 58-71.

Jourda J P., Djagoua E. V., Kouamé K., Saley M. B., Gronayes C., Achy J-J., Biémi J. et Razack M., 2006. Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (nord de la côte d'ivoire) : apport de l'imagerie ETM+ de Landsat. *Téledétection*, 6 (2) : 123-142.

Kabata-Pendias A. et Pendias H., 1992. Trace elements in soils and plants. Eds. CRC Press, New York, 365 p.

Kabata-Pendias A. et Pendias H., 2001. Trace elements in soils and plants. Ed. CRC Press, New York, 413 p.

Kainer K. A., Wadt L. H. O. et Staudhammer C. L., 2007. Explaining variation in Brasil nut fruit production. *Forest Ecology and Management*, 250 : 244-255.

Kissou R., Thiombiano L., Nébié A. K., Semde A. et Yago K. J., 2000. La Base mondiale de données sur les sols : avantages et faiblesses pour la connaissance et l'utilisation des milieux édaphiques au Burkina Faso. Quatorzième réunion du sous Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols. 9 au 13 Octobre 2000. Abomey, Bénin : 121-149.

Koné B., 2007. La couleur comme indication de la fertilité des sols (utilisation des données pour l'étude de la fertilité potentielle des sols ferrallitiques au-dessus de la

latitude 7 de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, 149 p.

Koné B., Diatta S., Oikeh S., Gbalou Y., Camara M., Dohm D. D. et Assa A., 2009. Estimation de la fertilité potentielle des Ferralsols par la couleur : usage de la couleur en morphopédologie. *Canadian Journal of Soil Science*, 89 (3) : 331-342.

Koné M., Aman A., Adou Yao C. Y., Coulibaly L. et N'guessan K. E., 2007. Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu de savane soudanienne en Côte d'Ivoire. *Revue Télédétection*, 7 : 433-446.

Kouakou Y. K. N., Yao G. F., Nangah K. Y., Guety T. P. et Yao-Kouamé A., 2013. Diagnostic du fonds pédogéochimique des sols développés sur matériaux volcanosédimentaires au Blafo-Guétou (Toumodi) dans le Centre-Sud de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2 (3): 344-354.

Kouamelan A. N., 1996. Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition Archéen-Protérozoïque. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Rennes, 284 p.

Lamachère J-M. et Puech C., 1995. Cartographie des états de surface. Actes de l'atelier international « télédétection et gestion des ressources en eau ». 29 novembre au 1^{er} décembre 1995. Montpellier, France : 45- 67.

Lamouroux M., 1979. Les sols bruns du piedmont du Nord de l'Iran. *Cah.ORSTOM, ser.Pedol.*, 17 (2) : 129-139.

Lamy I., 2006. Les Interactions Matières Organiques du Sol – Eléments Traces Métalliques: Enjeux Scientifiques et Environnementaux. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Poitiers, Poitiers, 84 p.

Landon J. R., 1991. Booker tropical soil manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics. Eds. Longman, Oxon, 474 p.

Legros J., 2007. Les grands sols du monde. Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 574 p.

Lemenih M. et Itanna F., 2004. Soil carbon stocks and turnovers in various vegetation types and arable lands along an elevation gradient in Southern Ethiopia. *Geoderma*, 123 : 177-188.

Liu Z., Shao M. et Wang Y., 2011. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 142 : 184-194.

Loring D. H. et Rantala R. T. T., 1990. Sediments and suspended particulate matter: total and partial methods of digestion. *ICES Techniques in Marine Environmental Sciences*, 9 : 1-14.

Lu X., Werner I. et Young T., 2005. Geochemistry and bioavailability of metals in sediments from northern San Francisco Bay. *Environment International*, 31 : 593-602.

Lucas Y., Luizao F-J., Chauvel A., Rouiller J. et Nahon D., 1993. The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. *Science*, 260 : 521-523.

Luo X., Zhou D., Liu X. et Wang Y., 2006. Solid/solution partitioning and speciation of heavy metals in the contaminated agricultural soils around a copper mine in eastern Nanjing city, China. *Journal of Hazardous Materials*, 131 : 19-27.

Maignien R., 1963. Les sols bruns eutrophes. Colloque sur la classification des sols des régions intertropicales : leurs corrélations et leur interprétation. 28 Mai au 7 Juin 1963. Lovanium : 1-6.

Maithani K., Arunachalam A., Tripathi R. S. et Pandey H. N., 1998. Nitrogen mineralization as influenced by climate, soil and vegetation in a subtropical humid forest in northeast India. *Forest Ecology and Management*, 109 : 91-101.

Mallouhi N., 1997. Interprétations des analyses du sol et principales caractéristiques de certaines substances organiques et du compost. Coopération Française, Programme d'Appui à la Formation Professionnelle des Agronomes, Faculté des Sciences Agronomiques, Université Nationale du Bénin, 20 p.

Mane L. K., Richard J-F. et Defourny P., 2001. Diagnostic des unités morpho-pédologiques de la vallée du fleuve Sénégal sur le terrain à partir de données satellitaires. *Sécheresse*, 12 : 7-14.

Manya S. et Maboko M. A. H., 2008. Geochemistry of the Neoproterozoic mafic volcanic rocks of the Geita area, NW Tanzania: Implications for stratigraphical relationships in the Sukumaland greenstone belt. *Journal of African Earth Sciences*, 52 : 152-160.

Marques J. J., Teixeira W. G., Schulze D. G et Curi N., 2002. Mineralogy of soils with unusually high exchangeable Al from the western Amazon region. *Clays Minerals*, 37 : 651-661.

Martin A. et Nolin M. C., 1991. Etude pédologique du comté de Chambly (Québec). Volume 2 : Description et classification des séries de sols. Direction générale de la Recherche, Canada, Contribution n°89-26, 144 p.

Masmoudi S., Rigane H., Ammar E. et Medhioub K., 2011. Effets de l'amendement de sols par différents types de composts sur le comportement pédo-géochimique, région d'El hajeb (Sfax, Tunisie). *Microbiologie et Hygiène Alimentaire*, 23 : 80-87.

Mathieu D-P. D-L-T., Samuel M., Partick M. et Karine J., 2012. L'imagerie multispectrale comme outil d'analyse et de diagnostic pour la productivité des sols en agriculture de précision. 4 p. [<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00671100>] (consulté le 26 Décembre 2012).

Mauricio P. et Ildeu A., 2005. Color attributes and mineralogical characteristics, Evaluated by radiometry of highly weathered tropical soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69 : 1162-1172.

Mbonigaba J. J. M., Nzeyimana I., Bucacu C. et Culot M., 2009. Caractérisation physique, chimique et microbiologique de trois sols acides tropicaux du Rwanda sous jachères naturelles et contrainte à leur productivité. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 13 (4) : 545-558.

- McBride M., 1991.** Adsorption of heavy metals by silicon and aluminium-oxide surfaces on clay minerals - comment. *Soil Science Society of America Journal*, 55 : 1508-1509.
- McLean E. O., 1982.** Soil pH and lime requirement. In : Page A. L., Miller R. H. et Keeney D. R. (Eds) : *Methods of soil Analysis : Chemical and Microbiological Methods*. Madison, Wisconsin : 199-224.
- Mendoza-Rosales C. C., Centeno-Garcia E., Silva-Romo G., Campos-Madrigal E. et Bernal J P., 2010.** Barremian rift-related turbidites and alkaline volcanism in southern Mexico and their role in the opening of the Gulf of Mexico. *Earth and Planetary Science Letters*, 295 : 419-434.
- Menzies N. W., 2003.** Toxic elements in acidic soils: chemistry and measurement. In: Rengel Z. (Ed) : *Handbook of soil acidity*. Marcel Dekker Inc., New York : 267-296.
- Moyin-Jesu E. J., 2008.** Soil fertility, chemistry and crop nutrition. Eds. Global-link, Swansea, 114 p.
- Mustapha S., 2007.** Physico-chemical properties and fertility status of some Haplic Plinthaquults in Bauchi local government of Bauchi state, Nigeria. *International Journal of Soil Science*, 2 (4) : 314-319.
- N'Diaye M. L., Guey-Girardet A. et Pfeifer H-R., 2006.** Impact des eaux usées sur l'évolution microbiologiques des sols: étude de cas à Pikine Dakar-Sénégal. *Agrosolutions*, 17 : 33-38.
- N'Guessan Y. M., Probst J. L., Bur T. et Probst A., 2009.** Enrichment and origin of trace elements in stream bed sediments from agricultural catchments (Gascogne region, S-W France). *Science of the Total Environment*, 407 : 2939-2952.
- Nangah K. Y., 2007.** Caractérisation pédologique des sols brunifiés de Kanhankro / Côte d'Ivoire. Mémoire du Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA), Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan, 67 p.

Nangah K. Y., Angui K. T. P., Kouakou Y. K. N., Rusu E., Yao-Kouamé A. et Savane I., 2013. Teneurs en éléments traces métalliques (ETM) dans quelques sols manganésifères dérivés de matériaux volcano-sédimentaires de Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2 : 372-383.

Nangah K. Y., Yao-Kouamé A., Yao G. F., Kouakou Y. K. N., Alui K. A. et Savane I., 2012. Attributs physico-chimiques et contrainte à la productivité agricole des sols du site manganésifère de Lauzoua (Guitry) en Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 50 : 3459-3467.

Nriagu J. O., 1989. A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals. *Nature*, 338 : 47-49.

Olsen S. R. et Sommers L. E., 1982. Phosphorus. In : Page A. L., Miller R. H. et Keeney D. R. (Eds) : *Methods of soil analysis*. Madison, Wisconsin : 403-430.

Ouattara N., 2001. Situation des ressources génétiques forestières de la Côte d'Ivoire (Zone de Savanes). FAO, Rome, 43 p.

Panichayapichet P., Nitorisavut S. et Simachaya W., 2007. Spatial distribution and transport of heavy metals in soil, ponded-surface water and grass in a Pb-contaminated watershed as related to land-use practices. *Environmental Monitoring and Assessment*, 135 : 181-193.

Parent L. E. et Dafir M., 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *Journal of American Society of Horticultural Science*, 117 : 239-242.

Pedro G. et Delmas A., 1970. Les principes géochimiques de la distribution des éléments traces dans les sols. *Annales agronomiques*, 21 : 483-518.

Perraud A., 1971. Les sols. In : Avenard J-M., Eldin M., Girard G., Sircoulon J., Touchebeuf P., Guillaumet J-L., Adjanohoun E. et Perraud A. (Eds) : *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire*. ORSTOM, Paris : 269-391.

Perraud A. et De la Soucherre P., 1969. Esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/500000.

Pichard A., Bisson M., Diderich R., Houeix N., Hulot C., Lacroix G., Lefevre J. P., Leveque S., Magaud H., Morin A., Rose M. et Pepin G., 2005. Chrome et ses dérivés, INERIS - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, 80p. [www.ineris.fr] (consulté le 15 Octobre 2011).

Piéri C., 1989. Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du Sahara. CIRAD, Paris, 444 p.

Ponge J-F., Jabiol B. et Gégout J-C., 2011. Geology and climate conditions affect more humus forms than forest canopies at large scale in temperate forests. *Geoderma*, 162 : 187-195.

Pouclet A., Vidal M., Delor C., Simeon I et Alric G., 1995. Le volcanisme birrimien du nord-est de la Côte d'Ivoire, mise en évidence de deux phases volcano-tectoniques distinctes dans l'évolution géodynamique du paléoprotérozoïque. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 3 (167) : 307-319.

Quantin C., Becquer T. et Berthelin J. 2002. Mn-oxide: a major source of easily mobilisable Co and Ni under reducing conditions in New Caledonia Ferralsols. *Comptes Rendus Geoscience*, 334 : 273-278.

Quantin C., Becquer T., Rouiller J.H. et Berthelin., J. 2001. Oxide weathering and trace metal release by bacterial reduction in a New Caledonia Ferralsols. *Biogeochemistry*, 53 : 323-340.

Quantin P., Dejou J., Tejedor M. et Jimenez C., 2007. Sols et paléo-altérites sur roches volcaniques du Cantal (France) : Exemple du Puy Courny. *Etude et Gestion des Sols*, 14 (1) : 43-62.

Quesada C. A., Lloyd J., Schwarz M., Patino S., Baker T. R., Czimczik C., Fyllas N. M., Martinelli L., Nardoto G. B., Schmerler J., Santos A. J. B., Hodnett M. G., Herrera R., Luizao F. J., Arneith A., Lloyd G., Dezzio N., Hilke I., Kuhlmann I., Raessler M., Brand W. A. Geilmann H., Moraes Filho J. O., Carvalho F. P., Araujo Filho R. N., Chaves J. E., Cruz Junior O. F., Pimentel T. P. et Paiva R.,

2010. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeosciences*, 7 : 1515-1541.

Quideau S. A., Chadwick Q. A., Benesi A., Graham R. C. et Anderson M. A., 2001. A direct link between forest vegetation type and soil organic matter composition. *Geoderma*, 104 : 41-60.

Rattan R. K., Datta S. P., Chhonkar P. K., Suribabu K. et Singh A. K., 2005. Impact à long terme d'irrigation avec des eaux usées sur la teneur en métaux lourds dans les sols, les récoltes, et les eaux. *Agriculture, Ecosystem and Environnement*, 109 : 310-322.

Raza M., Khan A. et Khan M. S., 2009. Origin of Late Palaeoproterozoic Great Vindhyan basin of North Indian shield: Geochemical evidence from mafic volcanic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34 : 716-730.

Redon P-O., 2009. Rôle de champignons mycorhiziens à arbuscules dans le transfert du cadmium (Cd) du sol à la luzerne (*Medicago truncatula*). Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 182 p.

Robinette C. E., Rabenhorst M. C. et Vasilas L. M., 2004. Identifying problem hydric soils in the Mid-Atlantic region. In : Vasilas L. M. et Vasilas B. L. (Eds) :A guide to hydric soils in the Mid-Atlantic region. version 1.0. Natural Resources Conservation Service, Morgantown, WV : 85-103.

[http://www.epa.gov/reg3esd1/wetlands/pdf/hydric_soils_midatlantic_2_2004.pdf]

(Consulté le 01 janvier 2013).

Römheld V. et Kirkby E. A., 2010. Research on potassium in agriculture : need and prospects. *Plant Soil*, 335 : 155-180.

Rooney C. P., Zhao F. J. et McGrath S. P., 2007. Phytotoxicity of nickel in a range of European soils: influence of soil properties, Ni solubility and speciation. *Environmental Pollution*, 145 : 596-605.

Ross S. M., 1994. Toxic metals in soil-plant systems. Ed. Wiley, Chichester, 469 p.

Schulin R., Curchod F., Mondeshka M., Daskalova A. et Keller, A., 2007. Heavy metal contamination along a soil transect in the vicinity of the iron smelter of Kremikovtzi (Bulgaria). *Geoderma*, 140 : 52-61.

Seregin I. V. et Kozhevnikova A. D., 2006. Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 53 : 257-277.

Shanker A. K., Cervantes C., Loza-Tavera H. et Avudainayagam S., 2005. Chromium toxicity in plants. *Environment International*, 31 : 739-753.

Soil Survey Staff, 2008. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. Available online at Soil Survey Geographic (SSURGO) Database [<http://soildatamart.nrcs.usda.gov>]. Consulté le 12 Novembre 2011.

Sollins P., Homann P. et Caldwell B. A., 1996. Stabilization and destabilization of soil organic matter : mechanisms and controls. *Geoderma*, 74 : 65-105.

Soubrand-Colin M., 2004. Localisation, distribution et mobilité des ETM dans des sols développés sur roches basaltiques en climat tempéré. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Limoges, 158 p.

Sow K., 1999. Caractérisation pédologique du bassin versant de Koutango. Mémoire d'ingénieur, Université Cheick Anta Diop, Dakar, 69 p.

Spain A. V., 1990. Influence of environmental conditions and some soil tropical Australian rainforest soils. *Australian Journal of soil Research*, 28 : 825-839.

Sparks D. L., 1995. Environnemental soil chemistry. Eds. Academic Press, San Diego, 267 p.

Sparks D. L., 2003. Environmental soil chemistry. Eds. Academic Press, San Diego, 352 p.

Sposito G., 1989. The Chemistry of Soils. Eds. Oxford University Press, New York, 277 p.

- Sterckeman T., Douay F., Balze D., Fourrier, H., Proix N. et Schwartz C., 2006.** Trace elements in soils developed in sedimentary materials from Northern France. *Geoderma*, 136 : 912-929.
- Story M. et Congalton R., 1986.** Accuracy assessment : A user's perspective (map interpretation). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52 : 397-399.
- Strieder A. J., Roldão D. G. et Hartmann L. A., 2000.** The Palma Volcano-Sedimentary Supersuite, Precambrian Sul-Riograndense Shield, Brazil. *International Geology Review*, 42 : 984-999.
- Stumm W. et Sulzberger B., 1992.** The cycling of iron in natural environments: considerations based on laboratory studies of heterogeneous redox processes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56 : 3233-3257.
- Swift R. et McLaren R., 1991.** Micronutrient adsorption by soils and soil colloids. In : Bolt G. H.; Boodt M. F.; Hayes M. H. B. et McBride M. B. (Eds.) : Interactions at the soil colloid-soil solution interface. Ed. Kluwer Academic, Dordrecht : 257-292.
- Tabatabai M. A. et Rogovska N. P., 2011.** Trace Element Concentrations of Iowa Surface Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42 : 1153-1166.
- Tan Z. X., Lal R., Smeck N. E. et Calhoun F. G., 2004.** Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables. *Geoderma*, 121 : 185-187.
- Tavares-Filho J. et Tessier D., 1998.** Influence des pratiques culturales sur le comportement et les propriétés de sol du parana (Brésil). *Etude et Gestion des Sols*, 5 (1) : 1-11.
- Thomas G. W., 1996.** Soil pH and soil acidity. In: Sparks D.L. (Eds.) : Methods of Soil Analysis: Chemical Methods, Part 3. Ed. Madison, Wisconsin : 475-490.
- Tourino S. I., 2005.** Mise en relation de la cartographie du rendement avec la distribution spatiale de l'état de surface du sol observée par télédétection : application dans un contexte d'agriculture de précision. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, 250 p.

- Tracol Y., 2004.** Etude des variations interannuelles de la production herbacée de pâturages sahéliens : exemple du Gourma malien. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III Paul-Sabatier, Toulouse, 235 p.
- Tremel-Schaub A. et Feix I., 2005.** Contamination des sols, Transferts des sols vers les plantes. Eds. EDP Sciences/ADEME, Angres, 413 p.
- Troeh F. R. et Thompson L. M., 2005.** Soils and soil fertility. Ed. Blackwell Publishing, Oxford, 489 p.
- Turner B. L. et Haygarth P. M., 2001.** Phosphorus solubilization in rewetted soils. *Nature*, 411 : 258-259.
- Van der Perk M., 2006.** Soil and Water Contamination, from molecular to catchment scale. Ed. Balkema, Leiden, 404 p.
- Van Reeuwijk L. P., 2002.** Procedures for soil analysis. International Soil Reference Information Centre (ISRIC), FAO, Wageningen, 120 p.
- Voncir N., Mustapha S., Tenebe V. A., Kumo A. L. et Kushwaha S., 2008.** Content and profile distribution of extractable zinc (Zn) and some physicochemical properties of soil along a toposequence at Bauchi, northern guinea savanna of Nigeria. *International Journal of Soil Science*, 3 (2) : 62-68.
- WRB (World reference base for soil resources), 2006.** A framework for international classification, correlation and communication. FAO, 128 p.
- Walkley A. et Black I. A., 1934.** An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37 : 29-38.
- Watmough S. A., Dillon P. J. et Epova E. N., 2005.** Metal partitioning and uptake in central Ontario forests. *Environnement Pollution.*, 134 : 493-502.
- Wedepohl K. H., 1995.** The composition of the continental-crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 : 1217-1232.

- Wei B. et Yang L., 2010.** A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal*, 94 : 99-107.
- Yay O., Alagha O. et Tuncel G., 2008.** Multivariate statistics to investigate metal contamination in surface soil. *Journal of Environmental Management*, 86 : 581-594.
- Yang P., Mao R., Shao H et Gao Y., 2009.** The spatial variability of heavy metal distribution in the suburban farmland of Taihang Piedmont Plain, China. *Comptes Rendus Biologies*, 332 : 558–566.
- Yao D., Delor C., Gadou G., Kohou, P., Okou A., Konate S. et Diaby I., 1995.** Notice explicative de la carte géologique feuille de Dimbokro, 21 p.
- Yao-Kouamé A., 2007.** Caractéristiques physiques des sols brunifiés dérivés des formations du complexe volcano sédimentaire de Kanhankro (Toumodi) en moyenne Cote d'Ivoire. *Revue CAMES- Série A*, 5 : 76-86.
- Yao-Kouamé A., 2008a.** Etude des sols brunifiés dérivés des matériaux du complexe volcano-sédimentaire de Toumodi en moyenne Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat *Es Sciences Naturelles*, Université de Cocody, Abidjan, 206 p.
- Yao-Kouamé A., 2008b.** Caractéristiques chimiques et physicochimiques des sols brunifiés développés sur les formations du complexe volcano sédimentaire de Kanhankro (Toumodi) en moyenne Côte d'Ivoire. *Revue CAMES - Série A*, 7 : 17-29.
- Yao-Kouamé A., Koné B. et Gala Bi T. J., 2010.** Caractérisation morpho-pédologique des sols bruns eutrophes développés sur les complexes volcano-sédimentaires ouest africains du birrimien à Blafo en Côte d'Ivoire. *Africa Geoscience Review*, 18 (1) : 23-32.
- Yeboua K. et Ballo K., 2000.** Caractéristiques chimiques du sol sous palmeraie. *Cahiers Agricultures*, 9 (1) : 73-76.
- Yoboué K. E., 2010.** Etude pédogéochimique et minéralogique des sols brunifiés dérivés des formations du complexe volcano-sédimentaire de Anikro et Kahankro

(Toumodi) dans le Centre-Sud de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 152 p.

Yoboué K. E. Yao-Kouamé A. et Alui K. A., 2010. Evolution pédogéochimique et minéralogique au Cours de l'altération des formations du complexe volcano-sédimentaire d'Anikro et de Kahankro (Toumodi) dans le Centre-Sud de la Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, 40 (1) : 60-72.

Youan Ta M., Lasm T., Jourda J-P., Kouamé K. F. et Razack M., 2008. Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (nord-est de la côte d'ivoire). *Revue Télédétection*, 8 (2) : 119-135.

Zayed A. M. et Terry N., 2003. Chromium in the environment : factors affecting biological remediation. *Plant and Soil*, 249 : 139-156.

ANNEXES

Annexe 1 : Fiche de description des sols

Date : 08-02-10

Lieu : Dassoumlé (Korhogo)

Profil : P9

Pente : 1% **Position topographique :** Haut de versant

Végétation :

Profondeur		0-10 cm		10-20 cm		20-60 cm	
Couleur	Humidité	7,5YR4/3	sec	5YR4/3	sec	5YR4/4	sec
	Matière Organique		humifère		Humifère		App humifère
Texture	% Argile	Limono-sableux	10	Limono-sableux	15	Limono-sableux	20
% éléments grossiers	% Quartz	88 %	25	87 %	30	82 %	25
	% Concrétions et nodules		65		65		70
	% Autres éléments		10		5		5
Structure générale	Taille	Polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse	cm	Polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse	cm	Polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse	cm
Structure du débit	Taille	Grumeleuse	cm	Grumeleuse	cm	Grumeleuse	cm
Cohésion générale	Cohésion agrégat	Peu cohérent	Peu cohérent	Peu cohérent	Peu cohérent	Peu cohérent	Peu cohérent
Porosité générale	Taille	Très poreux	mm	Très poreux	mm	Poreux	mm
Abondance des racines	Taille	Nombreuses racines	mm cm	Nombreuses racines	mm cm	Quelques racines	mm cm
Orientation des racines	Classe de drainage	Subhorizontale	1,2	Subhorizontale	1,6	Subhorizontale	1,6
Transition	Limite	Progressive	± régulière	Progressive	± régulière		
Contraintes		Bloc de roche + concrétion		Bloc de roche + concrétion		Bloc de roche + concrétion	
Type d'horizon		A ₁		A ₃		B	
Observations complémentaires							

Annexe 2 : Valeurs critiques des ETM dans le sol

Teneur critique dans les sols (mg.kg ⁻¹)	
Fe	56300
Mn	1000 - 3000
Cu	60 - 125
Zn	100 - 250
Ni	100
Cr	75 - 100
Pb	100-400
Co	25 - 50
Cd	0,7 - 2

Fageria *et al.*, 2002; Ross, 1994; Colinet, 2003.

Annexe 3 : Articles tirés de la thèse

- 1 **Nangah K. Y.**, Angui K. T. P., Kouakou Y. K. N., Rusu E., Yao-Kouamé A. et Savane I., 2013. Teneurs en éléments traces métalliques (ETM) dans quelques sols manganésifères dérivés de matériaux volcano-sédimentaires de Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2 : 372-383.

- 2 **Nangah K. Y.**, Yao-Kouamé A., Yao G. F., Kouakou Y. K. N., Alui K. A., et Savane I., 2012. Attributs physico-chimiques et contrainte à la productivité agricole des sols du site manganésifère de Lauzoua (Guitry) en Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 50: 3459-3467.

Annexe 4 : articles hors thèse

- 1 **Nangah K. Y.**, Angui K. T. P., Yao K. K. N., Yao G. F. Alui K. A., N'Guessan K. A., Yao-Kouamé A. et Savane I., 2013. Assessment of morphological and geological environment of manganese containing area in south west of Côte d'Ivoire. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 3 (1) : 23-32.
- 2 Kouakou Y. K. N., Yao G. F., **Nangah K. Y.**, Baka D., Adingra A. et Yao-Kouamé A., 2013. Caractères macromorphologiques des sols développés sur fonds volcano-sédimentaire au *Blafo-Gueto* (Toumodi) dans le centre-sud de la cote d'ivoire. *European Scientific Journal*, 9 : 18-30.
- 3 Kouakou Y. K. N., Yao G. F., **Nangah K. Y.**, Guety T. P. et Yao-Kouamé A., 2013. Diagnostic du fonds pédogéochimique des sols développés sur matériaux volcanosédimentaires au *Blafo-Guétó* (Toumodi) dans le Centre-Sud de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2 : 344-354.
- 4 Yao-Kouamé A., **Nangah K. Y.**, Alui K. A., N'Guessan K. A., Yao G. F. et Assa A., 2009. Pedo-Landscape and developpement of *Lippia multiflora* in Southern Côte d'Ivoire. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2 : 56-62.

RESUME

Les sols manganésifères sont caractérisés par des teneurs importantes en manganèse (9228 mg.kg^{-1} : valeur moyenne dans les sols de Côte d'Ivoire), qui, associées aux éléments traces métalliques, pourraient avoir des conséquences sur la physico-chimie des sols, et induire de graves dangers sur l'environnement et l'homme. C'est pourquoi, il est apparu nécessaire de procéder à l'évaluation physico-chimique et à la détermination des ETM des sols manganésifères de Côte d'Ivoire. Quatre sites de sols issus de formations volcano-sédimentaires, riches en manganèses, ont été choisis pour conduire l'étude, à travers une analyse toposéquentielle et une analyse de comparaison des sites. Les résultats ont montré que les sols manganésifères sont majoritairement de texture fine (argileuse à limono-argileuse), compensée, dans les horizons humifères, par une structure bien développée et stable (structure polyédriques subanguleuse). Les sols de haut et du moyen versant sont rougeâtres (2,5YR), et ceux du bas versant sont jaunâtre (7,5YR). Les sols sont franchement acides ($\text{pH} < 5,5$). Les taux de saturation en bases, les valeurs moyennes de CEC et les teneurs en matière organique sont faibles. En revanche N et P sont abondants, tout comme K^+ et Mg^{2+} , alors que ces Cambisols sont pauvres en Ca^{2+} . La minéralisation est bonne, avec $8 < \text{C/N} < 15$. Pour les bases échangeables, il existe un gradient décroissant du Nord (zone de Dassoumbélé, région savanicole, climat soudanais) au Sud (zone de Lauzoua, région forestière, climat attiéen). En revanche, pour le taux de matière organique et la CEC, ce sont les systèmes culturaux en présence qui expliquent leur variabilité spatiale. L'analyse des profils de sol a montré que le lessivage et la lixiviation sont les processus majeurs qui gouvernent la distribution des éléments chimiques dans le sol, par la présence d'un horizon d'accumulation en profondeur. Les teneurs en Eléments Traces Métalliques observées suivent l'ordre d'abondance suivant : $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Cd}$ à l'exception de Korhogo où $\text{Ni} > \text{Cr}$. Les teneurs en Cu ($172,8 \text{ mg.kg}^{-1}$), Zn ($110,73 \text{ mg.kg}^{-1}$), Cd ($1,06 \text{ mg.kg}^{-1}$), Mn ($9228,96 \text{ mg.kg}^{-1}$) se situent dans la gamme des teneurs critiques dans les sols, pouvant entraîner des phénomènes de toxicité. Toutefois, la dynamique verticale des ETM est d'une part, gouvernée par la teneur en argile, et d'autre part, par la teneur en carbone. La répartition et les expressions des ETM restent variables selon la zone d'étude, et essentiellement influencés par les processus pédogénétiques. L'utilisation des indices radiométriques dans la spatialisation a été significative dans les zones à faibles couvertures végétales, notamment à Korhogo.

Mots clés : Sols manganésifères, ETM, pH, Volcano-sédimentaire, Indices radiométriques, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

Manganiferous soils are characterized by high contents of manganese (9228 mg.kg^{-1} : average value in soils from Côte d'Ivoire), which, combined with trace elements (ETM) could affect the physico-chemistry of the soil and cause serious risk on the environment and on humans. Therefore, it became necessary to evaluate the physico-chemical and determination of trace element manganiferous soils of Côte d'Ivoire, to better understand their potential usefulness, limitations and establish a sustainable management of these soils. Four sites in soils developed on volcano-sedimentary formations, rich in manganese, under different microclimatic conditions, taking into account regional disparities were chosen. Toposequential analysis and comparison of sites were carried out. The results show that manganiferous soils have fine texture (clay to silty-clay), a well-developed and stable structure. Soils of top and middle slopes are reddish (2.5 YR) and the bottom is yellowish (7.5 YR). The pH are frankly acidic (< 5.5). Moreover, base saturation, CEC and organic matter are low. In contrast N and P are better represented as K^+ and Mg^{2+} , while the poor are Cambisols Ca^{2+} . Mineralization is good in these soils with $8 < \text{C/N} < 15$. For exchangeable bases, there is a decreasing gradient from the north (Dassoumbélé, savanna region, Sudanese climate), South (Lauzoua, forest area, very humid). In contrast, for rates of organic matter and CEC it is the cropping systems in the presence which explain their spatial variability. Further analysis of soil profiles showed that leaching is the major processe that govern the distribution of chemical elements in the soil, the presence of a horizon of accumulation in depth. Trace element contents observed follow the order of abundance according to : $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Cd}$. Cu (172.8 mg.kg^{-1}), Zn ($110.73 \text{ mg.kg}^{-1}$), Cd (1.06 mg.kg^{-1}), Mn ($9228.96 \text{ mg.kg}^{-1}$) and Fe ($46\ 699 \text{ mg.kg}^{-1}$) are in the range of critical concentrations in the soil, which can cause toxicity. However, the vertical dynamics, distribution and prediction models of trace element are very variable according to the study area, and are primarily influenced by pedogenetics processes. The use of radiometric indices in spatialization of manganiferous soil was significant in areas with low vegetation cover, especialy in Korhogo.

Keywords: manganiferous Soil, trace element, pH, volcano-sedimentary, radiometric indices, Côte d'Ivoire