

République de Côte d'Ivoire

Année Universitaire 2012-2013

Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique



Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY

N° d'ordre : 817/2013



UFR des Sciences de la Terre et des  
Ressources Minières

Laboratoire de Pédologie et de Géologie Appliquée

# THÈSE

Présentée à l'UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières  
de l'Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Cocody

*Pour obtenir le titre de*

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY DE COCODY**

**EN SCIENCES DE LA TERRE**

*Spécialité : Pédologie*

*par*

**KOUAKOU Yao Kouman Nestor**

# THÈME

MORPHOPÉDOLOGIE ET PÉDOGÉOCHIMIE DES SOLS DÉVELOPPÉS SUR  
MATÉRIAUX VOLCANO-SÉDIMENTAIRES AU BLAFO-GUÉTO (TOUMODI)  
DANS LE CENTRE-SUD DE LA CÔTE D'IVOIRE.

Soutenue publiquement le 12 Octobre 2013 devant le jury composé de :

M. AKA Kouamé	Professeur Titulaire, Université F. Houphouët-Boigny	Président
M. YAO-KOUAME Albert	Professeur Titulaire, Université F. Houphouët-Boigny	Directeur de Thèse
M. BIEMI Jean	Professeur Titulaire, Université F. Houphouët-Boigny	Rapporteur
M. SEI Joseph	Maître de Conférences, Université F. Houphouët-Boigny	Rapporteur
M. CAMARA Maméri	Directeur de Recherche, CNRA	Examineur

## DÉDICACE

À tous ceux qui, comme moi, sont empreints à se souvenir de cette pensée du sage contemporain P. R. SARKAR, qui m'a toujours guidé et continue de l'être :

*« l'âge de l'obscurité est arrivé à son terme. Nous avons franchi le seuil de l'aube étincelante et, il est grand temps d'appeler tout le monde à célébrer son avènement, à se joindre à notre effort, pour créer un nouveau rythme sur terre ».*

## AVANT-PROPOS

La rédaction de cette thèse est enfin achevée ! Que de trajets parcourus ! Que de difficultés affrontées ! Que d'espoirs nourris !

L'aboutissement de cette œuvre scientifique a pu se faire, non seulement grâce à mes capacités intellectuelles, à ma volonté manifeste de réussite, mais surtout, grâce à un soutien, à la fois didactique, financier, matériel et spirituel dont j'ai bénéficié.

Je voudrais, pour introduire cette longue traversée, me souvenir de mes années primaires, chez moi, à Bondoukou, à Tambi, mon village, dans le Nord-Est, mes années collège et lycée, à Béoumi, dans le grand Centre du pays, ensuite, à Divo, dans le Centre-Sud, jusqu'à mon entrée à l'Université, à Abidjan, dans le Sud. Bien entendu, je ne pourrai citer ici tous les moments vécus, la liste étant très longue.

Je tiens à remercier et à rendre un grand hommage à nos illustres Professeurs. Tout ce que nous apprenons étant le fait de nos prédécesseurs, nos enseignants, nos maîtres, je voudrais exprimer toute ma gratitude à tous les enseignants de l'UFR-STRM et, tout particulièrement au Professeur YAO-KOUAME Albert, mon directeur de Thèse, porteur de cette Thèse, sans qui, elle n'aurait jamais abouti. Je voudrais lui adresser ici, mes plus vifs remerciements, pour sa courtoisie, sa disponibilité avérée, ses conseils avisés, son engagement à œuvrer à l'épanouissement et à la formation des apprenants. Après lui, mes pensées vont à l'endroit de Feu Professeur ASSA Ayémou, mon directeur de mémoire de DEA, qui nous a quitté alors même que je m'apprêtais à m'engager dans les travaux de Thèse. Je n'oublie pas Feu Professeur POTHIN Kabran, Parrain de ma promotion, du nom de qui nous avons été baptisés à notre entrée en Maîtrise 1 des Sciences de la Terre (MST1-ST) en 2000.

Qu'il me soit permis d'exprimer mon profond respect au Professeur AKA Kouamé, Président de la commission scientifique de l'UFR-STRM et au Professeur BIEMI Jean, Secrétaire du domaine des Sciences naturelles à l'ASCAD, tous deux, anciennement Doyens de l'UFR-STRM. Sous leur mandat, s'est développée l'Association des Étudiants en Sciences de la Terre (AESTUCI), dont je fus le Vice-Président durant 4 ans. J'ai été marqué par leur simplicité et leur esprit d'ouverture, doublés de leur volonté manifeste de promouvoir les

Sciences de la Terre en Côte d'Ivoire. Je leur adresse mes sincères remerciements, pour tout ce qu'ils font en faveur de l'épanouissement des étudiants et, surtout, pour avoir accepté de faire partie du jury de soutenance de ma Thèse de Doctorat et d'y apporter un regard critique, en vue de l'amélioration du document. Je profite de l'occasion, pour remercier l'ensemble des membres du jury, à qui j'exprime toute ma gratitude et ma reconnaissance pour le temps si précieux qu'ils m'ont accordé et pour l'ensemble des propositions de corrections suggérées qui ont amélioré cette Thèse. Je voudrais, à cet effet, saluer Professeur SEI Joseph, spécialiste de la chimie des matériaux inorganiques à l'UFR des Sciences des Structures de la Matière et de Technologie (UFR-SSMT) de l'Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Cocody et Docteur CAMARA Maméri, Pédologue, Directeur de recherche au Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) pour leurs remarques et critiques très constructives.

J'accorde une reconnaissance toute particulière au Professeur YACE Ignace, Professeur émérite de l'UFR-STRM, de qui nous avons bénéficié des enseignements en Maîtrise 1 et 2 des Sciences de la Terre. Je ne voudrais pas oublier de remercier, Professeur AFFIAN Kouadio, Vice-Président de l'Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Cocody et ancien Doyen de l'UFR-STRM, Professeur BOFFOUÉ Moro Olivier, Doyen de l'UFR-STRM, Professeurs SORO Nagnin et DJAGOUA Éric Valère, Vice-Doyens de l'UFR-STRM, Professeur DIGBEHI Zeli Bruno, Responsable du troisième cycle de l'UFR-STRM, Professeur KOUAMÉ Fernand, Directeur du CURAT et tous les Directeurs de laboratoire dont Professeurs COULIBALY Yacouba, SOMBO Boko Célestin, MONDÉ Sylvain, LASM Théophile, EMERUWA Edjikémé. Je leur dis merci pour les enseignements reçus, ainsi qu'aux Professeurs DJRO Sagbrou Chérubin, JOURDA Jean Patrice Roger, OGA Marie-Solange, aux Docteurs AGHUI N'Guessan, KOUAMELAN Alain Nicaise et OUATTARA Adama, avec une pensée forte pour Feu Dr NAHO Jacques. Aux Docteurs KONE Brahim, ETTIEN Djetti Jean-Baptiste, KOUADIO Hyppolite, DEVISME BONGOUA Affi Jeanne et YOBOUE Kouadio Emile, du laboratoire de Pédologie, je dis merci pour les conseils et encouragements prodigués.

Je remercie également tous ceux qui, de près ou de loin, à un moment ou un autre, m'ont aidé, techniquement, ou de toute une autre manière. Je voudrais que l'on sache qu'il est difficile de n'oublier personne. J'associe à ces remerciements, mes amis et frères qui m'ont accompagné

sur le terrain, pour le prélèvement des différents échantillons. Il s'agit de YAO Guy Fernand, Dr BAKA Derving, GUETY Thiery Philippe et ADINGRA Achille.

Je n'oublie pas mes amis, frères Ananda Margiis, nos Acaryas, et, particulièrement mes camarades de promotion, la promotion « Pothin Kabran ». J'exprime également ma reconnaissance à tous mes camarades réunis au sein de l'AESTUCI, avec une pensée forte pour les anciens Présidents que sont, Dr ALLIALY Marc Ephrem, KOUTOUAN Ange Didier, BOSSO Hervé et Dr BAKA Derving. À la nouvelle génération, à la tête de laquelle se trouve, actuellement, le jeune frère AKA Ehui, je souhaite de faire bien et mieux que nous.

Merci à ma famille, particulièrement, mon père, KOUAKOU Minzan, ma mère, ABENAN Koupo, mes oncles, WANGO Touffo Maurice, KOFFI Koffi Nestor, mes frères, KOUAKOU Yao Kra, KOUAKOU Kouassi Minzan Sylvain, KOUAKOU Kouakou Roland, mes cousins, WANGO Yao Raymond, KRA Kobenan Lazare, et tous les autres auxquels je dédie ce mémoire, pour le soutien et l'attention qu'ils m'ont toujours accordés. À ma très chère femme, KRA Akoua Clarisse, je dis que cette œuvre est la sienne, et trouve ici, l'expression de toute ma gratitude, et, surtout merci pour le beau fils, Kanis-Améya KOUAKOU que tu m'as donné. Je vous dédie ce mémoire, ainsi qu'à ma nièce, Grâce-Ophélie KOUAKOU, qu'à mes neveux, Ethan David KOUAKOU et Messi Ariel KOUAKOU.

Enfin, je voudrais saluer et remercier tous mes collègues Doctorants et/ou Docteurs, notamment Dr KWADJO Koffi Eric, Dr N'GUESSAN Kouamé Antoine, Dr TEHOUA Lazare, ALUI Konan Alphonse, NANGAH Krogba Yves et KOUAKOU Josselin. Un grand merci, à tous!

# TABLE DES MATIÈRES

<b>AVANT-PROPOS .....</b>	<b>ii</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>xv</b>
<b>SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....</b>	<b>xvii</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xx</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>1</b>
<b>PREMIÈRE PARTIE : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>4</b>
<b>CHAPITRE I : NOTIONS DE MORPHOPÉDOLOGIE ET DE PÉDOGÉOCHIMIE... 4</b>	
<b>Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Morphopédologie : définition(s), concepts généraux et intérêt(s).....</b>	<b>4</b>
1.1.1. Définition(s).....	4
1.1.2. Concepts généraux de la morphopédologie.....	4
1.1.3. Intérêt(s) de la morphopédologie.....	6
<b>1.2. Notion de Pédogéochimie.....</b>	<b>8</b>
1.2.1. Définition.....	8
1.2.2. Concept et processus .....	8
1.2.3. Fond géochimique et fond pédogéochimique.....	11
1.2.4. Éléments traces métalliques.....	14
<b>Conclusion partielle.....</b>	<b>15</b>

<b>CHAPITRE II : MILIEU D'ÉTUDE .....</b>	<b>16</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1. Généralités sur la région d'étude.....</b>	<b>16</b>
2.1.1. Cadre géographique.....	16
2.1.2. Contexte climatique.....	16
2.1.3. Végétation.....	18
2.1.4. Relief .....	19
2.1.5. Cadre géologique général .....	19
2.1.6. Cadre pédologique .....	21
2.1.7. Contexte hydrographique .....	21
2.1.8. Activités économiques.....	21
<b>2.2. Caractéristiques spécifiques du site d'étude.....</b>	<b>23</b>
2.2.1. Localisation .....	23
2.2.2. Morphologie du paysage .....	23
2.2.3. Contexte géologique local .....	25
2.2.4. Types de sols .....	25
2.2.5. Occupation du sol .....	25
2.2.6. Activités minières .....	25
<b>Conclusion partielle.....</b>	<b>27</b>
<b>DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL D'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE .....</b>	<b>29</b>
<b>CHAPITRE III : MATÉRIEL UTILISÉ.....</b>	<b>29</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1. Matériel utilisé.....</b>	<b>29</b>
3.1.1. Matériel de terrain .....	29
3.1.2. Matériel de laboratoire.....	31

<b>3.2. Logiciels de traitement informatique .....</b>	<b>33</b>
<b>Conclusion partielle.....</b>	<b>33</b>
<b>CHAPITRE IV : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE .....</b>	<b>34</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1. Travaux effectués sur le terrain .....</b>	<b>34</b>
4.1.1. Approche géologique.....	34
4.1.2. Caractérisation morphopédologique.....	34
4.1.2.1. Choix des points de description et d'échantillonnage.....	35
4.1.2.2. Ouverture et description des fosses pédologiques .....	35
4.1.2.3. Échantillonnage.....	37
<b>4.2. Travaux effectués au laboratoire .....</b>	<b>38</b>
4.2.1 Confection et observation de lames minces .....	38
4.2.2. Analyse au microscope électronique à balayage (MEB).....	38
4.2.2.1. Mode opératoire.....	38
4.2.2.2. Mise en route du MEB et microanalyse .....	39
4.2.3. Analyse chimique totale en solution.....	40
4.2.3.1. Dosage des éléments traces métalliques (ETM) .....	40
4.2.3.2. Détermination du pH et du potentiel d'oxydo-réduction des sols .....	41
<b>4.3. Traitement des données .....</b>	<b>42</b>
4.3.1. Analyse statistique des données chimiques et géochimiques des échantillons de sols et de roches .....	43
4.3.1.1. Analyse de la variance .....	43
4.3.1.2. Étude de la matrice de corrélation sur les données sols .....	43
4.3.1.3. Analyse en composantes principales des ETM des sols .....	43
4.3.2. Détermination de l'état d'altération des roches et de leur origine sédimentaire .....	44
4.3.3. Détermination de l'indice d'altération des échantillons sols.....	44

4.3.4. Étude de quelques ratios d'oxydes .....	45
<b>Conclusion partielle.....</b>	<b>45</b>
<b>TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS, INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSION .....</b>	<b>46</b>
<b>CHAPITRE V : RÉSULTATS.....</b>	<b>46</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>46</b>
<b>5.1. Caractérisation des matériaux géologiques .....</b>	<b>46</b>
5.1.1. Photographies des roches et coordonnées des points de prélèvement.....	46
5.1.2. Analyse microscopique des lames minces.....	48
5.1.2.1. Cas des lames minces issues des roches du Blafo .....	48
5.1.2.2. Cas des lames minces issues des roches du Guéto.....	48
5.1.3. Microanalyse de Rayon X sur poudre de roche.....	51
5.1.4. Teneur totale des ETM étudiés sur poudre de roche .....	51
5.1.5. Caractères géochimiques des roches prélevées .....	55
<b>5.2. Caractères morphopédologiques des sols étudiés.....</b>	<b>57</b>
5.2.1. Coordonnées des profils de sols étudiés au Blafo et au Guéto .....	57
5.2.2. Caractérisation des sols étudiés au Blafo et au Guéto .....	57
5.2.2.1. Organisation de la toposéquence N108° du Blafo .....	57
5.2.2.1.1. Description des caractères physiques des sols du Blafo .....	60
5.2.2.1.2. Appréciation des caractères physico-chimiques des sols du Blafo.....	64
5.2.2.2. Organisation de la toposéquence N185° du Guéto .....	69
5.2.2.2.1. Description des caractères physiques des sols du Guéto .....	69
5.2.2.2.2. Appréciation des caractères physico-chimiques des sols du Guéto.....	75
<b>5.3. Fond pédogéochimique des sols étudiés .....</b>	<b>81</b>
5.3.1. Données géochimiques de la microanalyse R-X .....	81
5.3.1.1. Composition chimique, indice d'altération et minéralogie des sols du Blafo .....	81

5.3.1.1.1. Composition chimique des sols du Blafo.....	81
5.3.1.1.2. Indices d'altération des sols du Blafo .....	88
5.3.1.1.3. Appréciation de divers rapports d'oxydes dans les sols du Blafo .....	93
5.3.1.2. Composition chimique, indice d'altération et minéralogie des sols du Guéto .....	95
5.3.1.2.1. Composition chimique des sols du Guéto.....	95
5.3.1.2.2. Indice d'altération des sols du Guéto .....	103
5.3.1.2.3. Examen de rapports d'oxydes divers dans les sols du Guéto .....	106
5.3.2. Teneur des ETM étudiés dans les sols par analyse spectrométrique .....	110
5.3.2.1. Teneur en ETM des sols du Blafo.....	110
5.3.2.1.1. Dynamique verticale des ETM étudiés .....	110
5.3.2.1.2. Dynamique latérale des ETM étudiés .....	117
5.3.2.2. Teneur en ETM des sols du Guéto.....	120
5.3.2.2.1. Dynamique verticale des ETM étudiés .....	120
5.3.2.2.2. Dynamique latérale des ETM étudiés .....	122
5.3.2.3. Étude corrélative entre les ETM, le pH, l'Eh et l'indice d'altération.....	130
5.3.2.3.1. Cas des sols du Blafo .....	130
5.3.2.3.2. Cas des sols du Guéto .....	136
5.3.2.4. Principaux facteurs corrélatifs entre les variables étudiés .....	141
5.3.2.4.1. Cas des sols du Blafo .....	144
5.3.2.4.2. Cas des sols du Guéto .....	146
<b>Conclusion partielle.....</b>	<b>149</b>
<b>CHAPITRE VI : INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSION.....</b>	<b>152</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>152</b>
6.1. Informations sur les formations géologiques étudiées .....	152
6.2. Morphopédologie des sols étudiés .....	154
6.3. Pédogéochimie des sols étudiés .....	159

<b>Conclusion partielle.....</b>	<b>166</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>167</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>167</b>
<b>PERSPECTIVES.....</b>	<b>169</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>170</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>192</b>
<b>PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES</b>	

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I : NOTIONS DE MORPHOPÉDOLOGIE ET DE PÉDOGÉOCHIMIE

Figure 1 : Toposéquence des sols sur granite du Haut-Vivarais en France .....	5
Figure 2 : Cartographie numérique des sols .....	7
Figure 3 : Altération physique avec éclatement de la roche.....	10
Figure 4 : Expression de la modification du rapport surface/volume .....	10
Figure 5 : Étapes de la dissolution incongruente de l'orthose .....	10
Figure 6 : Diagramme de Goldschmidt .....	10
Figure 7 : Appréciation entre la contamination diffuse et la contamination locale (Perreira et Sonnet, 2007) .....	13

## CHAPITRE II : MILIEU D'ÉTUDE

Figure 8 : Cadre géographique de la Côte d'Ivoire avec différentes écozones ( <i>in</i> Yao-Kouamé, 2008).....	17
Figure 9 : Carte géologique simplifiée montrant la répartition des formations géologiques de Côte d'Ivoire (d'après la carte de Tagini, 1971, modifiée) .....	20
Figure 10 : Carte des sols du Centre de la Côte d'Ivoire (d'après la carte de Avenard <i>et al.</i> , 1971).....	22
Figure 11 : Localisation du site de l'étude.....	24
Figure 12 : Géologie locale au niveau du Blafo-Guétó (d'après Grandin, 1976).....	26
Figure 13 : Une vue de la végétation et du paysage observés au Blafo-Guétó .....	26
Figure 14 : Plates-formes de forage au Blafo-Guétó.....	28
Figure 15 : Forte érosion du sol avec dépôt de débris de roche .....	28

### **CHAPITRE III : MATÉRIEL UTILISÉ**

Figure 16 : Vue des collines Blafo et Guéto .....	30
Figure 17 : Appareillage MEB/EDS utilisé.....	32

### **CHAPITRE IV : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE**

Figure 18 : Toposéquences implantées au Blafo et au Guéto .....	36
---	----

### **CHAPITRE V : RÉSULTATS**

Figure 19 : Affleurement de roche sur flanc de la colline Guéto (A), de la colline Blafo (B) ; C : Vue macroscopique d'une roche consolidée .....	47
Figure 20 : Différents faciès de métasédiments observés au Guéto (A et B) et au Blafo (C et D).....	47
Figure 21 : Microphotographies et spectres de la roche R1 prise au Blafo.....	49
Figure 22 : Microphotographies et spectres de la roche R2 prise au Blafo.....	50
Figure 23 : Microphotographies et spectres de la roche R3 prise au Guéto.....	52
Figure 24 : Microphotographies et spectres de la roche R4 prise au Guéto.....	53
Figure 25 : Diagramme d'Hugues (1973) appliqué aux métasédiments étudiés .....	56
Figure 26 : Diagramme de Herron (1988) appliqué aux métasédiments étudiés .....	56
Figure 27 : Toposéquence N108° ouverte au Blafo .....	58
Figure 28 : Toposéquence N185° ouverte au Guéto .....	59
Figure 29 : Dynamique verticale des éléments grossiers (EG) dans les sols du Blafo .....	63
Figure 30 : Dynamique latérale des éléments grossiers le long de la toposéquence au Blafo .	65
Figure 31 : Dynamique latérale du degré d'acidité des sols le long de la toposéquence au Blafo .....	68
Figure 32 : Dynamique latérale du potentiel redox des sols le long de la toposéquence au Blafo .....	68
Figure 33 : Comparaison pH/Eh de chaque profil de la toposéquence du Blafo .....	70

Figure 34 : Dynamique verticale des éléments grossiers dans les sols du Guéto .....	74
Figure 35 : Dynamique latérale des éléments grossiers le long de la toposéquence au Guéto	76
Figure 36 : Dynamique latérale du degré d'acidité des sols le long de la toposéquence au Guéto .....	79
Figure 37 : Dynamique latérale du potentiel redox des sols de la toposéquence au Guéto .....	79
Figure 38 : Comparaison pH/Eh de chaque profil de la toposéquence du Guéto .....	80
Figure 39 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil B1 .....	84
Figure 40 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil B2 .....	85
Figure 41 : Dynamique verticale des oxydes dans le profil B3 .....	86
Figure 42 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil B4 .....	87
Figure 43 : Indices d'altération CIA et STI des profils du Blafo .....	91
Figure 44 : Dynamique latérale des indices d'altération CIA (A) et STI (B) des sols au Blafo .....	92
Figure 45 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil G1 .....	98
Figure 46 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil G2 .....	99
Figure 47 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil G3 .....	100
Figure 48 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil G4 .....	101
Figure 49 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil G5 .....	102
Figure 50 : Indices d'altération CIA et STI des profils du Guéto .....	105
Figure 51 : Dynamique latérale des indices d'altération CIA (A) et STI (B) des sols au Guéto .....	107
Figure 52 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil B1 .....	113
Figure 53 : Dynamique latérale des ETM dosés au niveau du profil B2 .....	114
Figure 54 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil B3 .....	115
Figure 55 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil B4 .....	116
Figure 56 : Couverture latérale des ETM étudiés par tranche d'horizons organo-minéraux (Hs) et horizons de profondeur (Hp), .....	119

Figure 57 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil G1 .....	123
Figure 58 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil G2 .....	124
Figure 59 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil G3 .....	125
Figure 60 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil G4 .....	126
Figure 61 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil G5 .....	127
Figure 62 : Couverture latérale des ETM étudiés par tranche d'horizons organo-minéraux (Hs) et horizons de profondeur (Hp) .....	129
Figure 63 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil B1 .....	145
Figure 64 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil B2 .....	145
Figure 65 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil B3 .....	147
Figure 66 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil B4 .....	147
Figure 67 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil G1 .....	148
Figure 68 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil G2 .....	148
Figure 69 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil G3 .....	150
Figure 70 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil G4 .....	150
Figure 71 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil G5 .....	151

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Coordonnées des échantillons roches prélevés au Blafo et au Guéto .....	46
Tableau II : Éléments présents dans les échantillons de roche du Blafo et du Guéto (% de masse).....	54
Tableau III : Éléments majeurs des échantillons de roche du Blafo et du Guéto (en %).....	54
Tableau IV : Teneur des ETM étudiés dans les roches prélevées au Blafo et au Guéto (en ppm) .....	55
Tableau V : Références géographiques des profils ouverts au Blafo et au Guéto .....	58
Tableau VI : Principaux caractères macromorphologiques des sols décrits au Blafo.....	61
Tableau VII : Éléments grossiers par horizons (Blafo).....	65
Tableau VIII : Sols décrits au Blafo.....	65
Tableau IX : pH et Eh des horizons des profils du Blafo.....	67
Tableau X : pH et Eh des horizons de surface (Hs) et de profondeur (Hp) du Blafo .....	67
Tableau XI : Principaux caractères macromorphologiques des sols décrits au Guéto.....	72
Tableau XII : Éléments grossiers par horizons (Guéto).....	76
Tableau XIII : Sols décrits au Guéto .....	76
Tableau XIV : pH et Eh des horizons des profils du Guéto .....	78
Tableau XV : pH et Eh des horizons de surface et de profondeur du Guéto .....	78
Tableau XVI : Composition en oxydes majeurs des sols du Blafo (en %) .....	82
Tableau XVII : Indices d'altération CIA et STI des sols du Blafo.....	90
Tableau XVIII : Indices d'altération CIA et STI en fonction des tranches d'horizon (Blafo)..	92
Tableau XIX : Quelques ratios d'oxydes majeurs des sols du Blafo.....	94
Tableau XX : Composition en oxydes majeurs des sols du Guéto .....	96
Tableau XXI : Indices d'altération CIA et STI des sols du Guéto .....	104

Tableau XXII : Indices d'altération CIA et STI par tranche d'horizon .....	107
Tableau XXIII : Quelques ratios d'oxydes majeurs dans les sols du Guéto.....	108
Tableau XXIV : Teneur totale des ETM dosés dans les sols issus du Blafo .....	111
Tableau XXV : Teneur totale des ETM dosés par tranche d'horizons organo-minéraux et horizons de profondeur dans les sols du Blafo.....	118
Tableau XXVI : Teneur totale en ETM dans les sols issus du Guéto .....	121
Tableau XXVII : Teneur totale des ETM dosés par tranche d'horizons organo-minéraux et horizons de profondeur dans les sols du Guéto.....	128
Tableau XXVIII : Coefficients de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil B1 .....	132
Tableau XXIX : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil B2 .....	133
Tableau XXX : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil B3 .....	134
Tableau XXXI : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil B4 .....	135
Tableau XXXII : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil G1 .....	138
Tableau XXXIII : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil G2 .....	139
Tableau XXXIV : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil G3 .....	140
Tableau XXXV : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil G4 .....	142
Tableau XXXVI : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil G5 .....	143

## SIGLES ET ABRÉVIATIONS

**ACP** : Analyse en Composantes Principales

*al.* : Alliés, Collaborateurs

**ANADER** : Agence Nationale d'Appui au Développement Rural

**ANOVA** : Analyse de Variance

**ASCAD** : Académie des Sciences, des arts, des Cultures d'Afrique et des Diasporas africaines

**BNETD** : Bureau National d'Études Techniques et de Développement

**CAR** : Centre d'Analyse et de Recherche

**CMED** : Commission Mondiale de L'Environnement et du Développement

**CNRA** : Centre National de Recherche Agronomique

**CIAPOL** : Centre Ivoirien Antipollution

**CPCS** : Commission de Pédologie et de Cartographie des sols

**Eh** : Potentiel d'oxydo-réduction

**ETM** : Éléments Traces Métalliques

**GPS** : Global Positioning System (Système de localisation mondial)

**INP-HB** : Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny

**MEB** : Microscope Électronique à Balayage

**PETROCI** : Société Nationale d'Opérations Pétrolières de la Côte d'Ivoire

**pH** : potentiel Hydrogène

**ppm** : Partie par million

**SODEMI** : Société pour le Développement Minier de la Côte d'Ivoire

**UFR-STRM** : Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources  
Minières

**WRB** : World Reference Base (base de référence mondiale)

## RÉSUMÉ

**Titre : Morphopédologie et pédogéochimie des sols développés sur matériaux volcano-sédimentaires au Blafo-Guéto (Toumodi) dans le Centre-Sud de la Côte d'Ivoire.**

La zone du Blafo-Guéto, située au Centre-Sud de la Côte d'Ivoire, actuellement sujette à une intense activité d'exploration minière, est à potentialités manganésifère et aurifère. Son substratum géologique, appartenant à la série des matériaux volcano-sédimentaires, a développé une importante couche de sol, qui, peut-être remobilisée et affectée par l'action minière. Ainsi, pour disposer de données de base ou initiales sur les sols de cette localité, nécessaires, en cas de besoin, à une réhabilitation du site, cette étude est réalisée et vise à apprécier le statut actuel de ces sols développés. À partir de la caractérisation morphopédologique et pédogéochimique, l'établissement d'une base de données des caractères macromorphologiques et des teneurs en éléments traces métalliques (ETM), tels que l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le Mercure (Hg), le manganèse (Mn), le molybdène (Mo), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le strontium (Sr), le titane (Ti) et le zinc (Zn) a été possible. Sur la base des caractères macromorphologiques décrits sur le terrain, dans des fosses pédologiques de deux toposéquences, l'une, sur la colline Blafo, l'autre, sur la colline Guéto, l'on a pu démontrer que les sols étudiés sont tous brunifiés, remaniés et rajeunis, à pH acide et moyennement acide, à structure grumeleuse, au niveau des horizons humifères jusqu'à 30-40 cm. En revanche, au niveau des horizons intermédiaires et ceux de profondeur, la structure est polyédrique subanguleuse. La classe de drainage est bonne dans les horizons humifères ou de surface, et, la texture des sols est argilo-sablo-limoneuse à argileuse. Le pourcentage d'éléments grossiers est au-delà de 60% et les tâches d'hydromorphie, signe d'un mauvais drainage interne, commencent à apparaître à partir des horizons intermédiaires ou horizons d'accumulation. S'agissant des teneurs en ETM des échantillons sols, déterminées par microanalyse de rayon X au MEB et par spectrométrie d'absorption atomique à flamme (SAAF), l'étude a permis de savoir que dans les sols de cette région, en dehors du cuivre (Cu), du manganèse (Mn), du molybdène (Mo), du titane (Ti) et plus ou moins du cadmium (Cd), les teneurs des ETM étudiés ne dépassent pas les valeurs limites habituellement indiquées. Les valeurs déterminées sont comprises entre 0,05 et 2,51 mg.kg<sup>-1</sup> pour le cadmium (Cd), 12,71 et 57,07 mg.kg<sup>-1</sup> pour le chrome (Cr), 45,53 et 263,46

mg.kg<sup>-1</sup> pour le cuivre (Cu), 25965,62 et 59304,56 mg.kg<sup>-1</sup> pour le fer (Fe), 4229,58 et 15572 mg.kg<sup>-1</sup> pour le manganèse (Mn), 1,67 et 20,78 mg.kg<sup>-1</sup> pour le molybdène (Mo), 12,62 et 48,96 mg.kg<sup>-1</sup> pour le nickel (Ni), 11,33 et 51,59 mg.kg<sup>-1</sup> pour le plomb (Pb), 67 et 192,84 mg.kg<sup>-1</sup> pour le strontium (Sr), 790 et 5493,28 mg.kg<sup>-1</sup> pour le titane (Ti), 19,80 et 106,76 mg.kg<sup>-1</sup> pour le zinc (Zn). Quant à l'arsenic (As) et le mercure (Hg), leurs teneurs sont inférieures à 0,25 mg.kg<sup>-1</sup> et, seuls le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), le molybdène (Mo), le titane (Ti) et plus ou moins le cadmium (Cd), dont les teneurs sont au-delà des teneurs habituellement observées dans les sols, présentent une anomalie géochimique. Le classement, dans l'ordre décroissant, des concentrations mesurées dans les sols du Blafo-Guétou, des plus élevées aux plus faibles est le suivant : Fe > Mn > Ti > Cu > Sr > Zn > Cr > Pb > Ni > Mo > Cd > As, Hg. Quant aux roches rencontrées dans le périmètre du prélèvement des échantillons de sols, décrites au microscope pétrographique et étudiées par microanalyse de rayon X au MEB, elles se composent de métasédiments, très altérés et riches en silicium (Si).

**Mots-clés :** Morphopédologie, Fond pédogéochimique, ETM, Blafo-Guétou, Côte d'Ivoire.

## ABSTRACT

**Title: Morphopedology and Pedogeochemistry of soil developed on volcano-sedimentary materials in Blafo-Guéto at the Center-South part of Côte d'Ivoire.**

The Blafo-Guéto area, situated at the center-south part of Côte d'Ivoire, actually concerned by mining exploration, have manganese and gold potential. The geology of this area, composed by volcano-sedimentary rocks, has developed an important volume of soil, which can, maybe affected by the mining activity. So, to appreciate the current status of developed soil in this area, this study is undertaken. With morphopedological and Pedogeochemistry characterization, the establishment of a database, which can be used as reference value for morphopedological parameters and the current contents in Heavy metals, such as arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), iron (Fe), mercury (Hg), manganese (Mn), molybdenum (Mo), nickel (Ni), lead (Pb), strontium (Sr), titanium (Ti) and zinc (Zn) has been done. Based on the field description of these macromorphological parameters, by opening soil profile through two lines, the one on the hill Blafo, the other one on the hill Guéto, it was shown that the soil are reshaped and in brown color, and goes to acidic and lower acidic. The soil structures are lumpy in humus horizons which go to 30-40 cm. On the other hand, the structure is polyhedral sub angular in intermediate and deep horizons. The drainage class is good in the humus or surface horizons and all the soil texture goes from silty sandy clayey to clayey. The percentage of the coarse elements is beyond 60 and the hydromorphic spots, signs of a bad internal drainage begin to appear from the intermediate or accumulate horizons. For the heavy metals contents, determined by X-ray microanalysis and by Atomic absorption spectroscopy (AAS), this study allowed to know that except copper (Cu), manganese (Mn), molybdenum (Mo), titanium (Ti) and more or less cadmium (Cd), the studied heavy metals, does not exceed the naturally indicated limit values. These measured values are included between 0.05 to 2.51 mg.kg<sup>-1</sup> for cadmium (Cd), 12.71 to 57.07 mg.kg<sup>-1</sup> for chromium (Cr), 45.53 to 263.46 mg.kg<sup>-1</sup> for copper (Cu), 25965.62 to 59304.56 mg.kg<sup>-1</sup> for iron (Fe), 4229.58 to 15572 mg.kg<sup>-1</sup> for manganese (Mn), 1.67 to 20.78 mg.kg<sup>-1</sup> for molybdenum (Mo), 12.62 to 48.96 mg.kg<sup>-1</sup> for nickel (Ni), 11.33 to 51.59 mg.kg<sup>-1</sup> for lead (Pb), 67 to 192.84 mg.kg<sup>-1</sup> for strontium (Sr), 790 to 5493.28 mg.kg<sup>-1</sup> for titanium (Ti) and 19.80 to 106.76 mg.kg<sup>-1</sup> for zinc (Zn). For arsenic (As) and mercury (Hg), the measured values are lower than 0.25 mg.kg<sup>-1</sup>

and, only copper (Cu), manganese (Mn), molybdenum (Mo), titanium (Ti) and more or less cadmium (Cd), indicated a geochemical anomaly, because exceeding the natural contents in soil. The ranking, in the decreasing order, from the highest to the lowest contents measured in the Blafo-Guéto soils, indicates that : Fe > Mn > Ti > Cu > Sr > Zn > Cr > Pb > Ni > Mo > Cd > As, Hg. For rocks within the profile area, described with a petrographic microscope and studied by X-ray microanalysis, they nature are metasedimentary and be altered, rich in silicon (Si).

**Keywords:** Morphopedology, Pedogeochemistry background, Heavy metals, Blafo-Guéto, Côte d'Ivoire.

# **I**NTRODUCTION GÉNÉRALE

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Partout dans le monde, la question de l'impact environnemental, de plus en plus importante, est devenue un enjeu majeur (CMED, 1987 ; FIDA, 2002) pour lequel, les principaux problèmes rencontrés, auxquels l'on accorde une attention toute particulière, sont nombreux. Qu'il s'agisse du réchauffement climatique de la planète (Claussen *et al.*, 2003 ; Brown *et al.*, 2007 ; Barnett et Adger, 2007 ; Pouliotte *et al.*, 2009 ; Leonard, 2011), de la raréfaction de l'eau potable (Brou *et al.*, 2005), de la pollution de l'eau et de l'air (ADEME, 2008a, 2008b), de la dégradation de la biodiversité, des émissions des polluants organiques persistants et d'autres substances toxiques (Armienta *et al.*, 2003) et de la dégradation du sol (Boardman, 2010 ; Feng *et al.*, 2010 ; Mullana *et al.*, 2012), les causes et les effets de la dégradation de l'environnement sont multiples, et varient, souvent, selon les régions, les pays et les zones agro-écologiques (FIDA, 2002).

Par exemple, dans l'industrie minière, l'impact d'une exploitation, sur le sol, est souvent marqué par une forte concentration en éléments traces métalliques (Gómez-Álvarez *et al.*, 2012), un pH très bas (Miller *et al.*, 2004 ; Bech *et al.*, 2012), une faible capacité de rétention en eau, une forte conductivité électrique (Ernst, 1996 ; Conesa *et al.*, 2006) et une modification significative du pédopaysage. Dans ces conditions, les propriétés et les caractères du sol se trouvent ainsi affectés, auxquels s'y ajoute la dégradation des ressources en eau, de la faune et de la flore. Dès lors, il se pose un réel problème de gestion de l'environnement (Dudka et Adriano, 1997 ; Saïdi *et al.*, 2002 ; Braungardt *et al.*, 2003 ; Bouabdli *et al.*, 2004 ; Blowes *et al.*, 2004 ; Figueira et Ribeiro, 2005 ; Navarro *et al.*, 2008 ; Desbarats *et al.*, 2011 ; Shaw *et al.*, 2011 ; Qiu *et al.*, 2012 ; Salinas Villafane *et al.*, 2012), d'autant plus que le sol remplit une multitude de fonctions essentielles à la vie. En réponse à ces problèmes, et, dans la perspective d'un développement durable, des actions sont de plus en plus menées pour, soit la protection des sols, soit la remise en état des sites pollués. Ces actions, le plus souvent, visent l'évaluation de l'extension de la contamination, en renvoyant à la distinction entre la contamination provenant de sources diffuses (retombées atmosphériques, pratique agricole), et celle causée par des sources clairement confinées (contamination locale ou ponctuelle, liée à un site industriel).

Selon Colinet *et al.*, (2004), il est primordial, dans le cadre de la gestion appropriée de sites pollués, de se référer à l'état des sols « naturels » voisins, pour distinguer la part de la contamination des sols, propre à l'installation industrielle, de celle qui préexistait avant son

fonctionnement. Même si, ce qu'affirme cet auteur est essentiel, il est en revanche, plus intéressant, lorsque cela est possible, de déterminer les données sol de l'espace concerné, avant une probable exploitation, pour en faire une valeur de référence locale (Baize, 1997 ; Darmendrail *et al.*, 2000 ; Baize et Tercé, 2002 ; Baize et Sterckeman, 2004).

À partir, et sur la base de ces préoccupations, l'étude actuelle a été entreprise, au Blafo-Guéto, une zone du Centre-Sud de la Côte d'Ivoire, où les potentialités manganésifères (Grandin et Perseil, 1983) et aurifères sont avérées. Cette zone, à matériaux volcano-sédimentaires, est actuellement l'objet de travaux d'exploration minière, et, posera, incontestablement, par l'action minière, un problème environnemental. Par ailleurs, les sols qui y sont décrits, notamment, sur la colline Blafo, sont brunifiés (Yao-Kouamé *et al.*, 2011), et suscitent un intérêt scientifique majeur. En effet, s'agissant des sols bruns, Vaudour (1968) et Perraud (1971), ont admis que leur environnement, initialement connu, les localise sous climat tempéré et méditerranéen. Or, dans le cas du Blafo-Guéto, le climat est de type tropical. C'est pourquoi, la localité du Blafo-Guéto constitue une certaine curiosité au plan pédologique, et mérite d'être étudiée, notamment, sur des points de vue morphopédologique et pédogéochimique. L'objectif principal d'une telle étude, est de contribuer à la caractérisation des sols au Blafo-Guéto et, de disposer d'informations nécessaires, pour amorcer l'établissement d'une base de données, indispensable, le cas échéant, à une stratégie de réhabilitation du site. De façon spécifique, il s'agira d'examiner :

- les organisations verticales et latérales des sols ;
- le faciès des sols ;
- les concentrations actuelles en éléments traces métalliques, notamment, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr, Ti, Zn dans ces sols ;
- les distributions et corrélations de ces éléments traces métalliques.

Pour ces objectifs, cette étude consistera à répondre aux hypothèses de recherche émises, qui sont :

- les sols du Blafo-Guéto résultent d'un processus pédogénétique naturel et non d'un phénomène d'anthropisation ;
- les sols du Blafo-Guéto sont bien structurés et bien développés ;
- le fond pédogéochimique local indique des teneurs en éléments traces métalliques identiques ou très proches de celles habituellement rencontrées dans les sols.

Le présent mémoire, qui rend compte du travail réalisé, est organisé en trois grandes parties. La première partie traite, de façon non exhaustive, des généralités sur le milieu naturel du Centre-Sud de la Côte d'Ivoire, des notions de morphopédologie et pédogéochimie. La deuxième partie, aborde les aspects relatifs au matériel utilisé, présente la méthodologie de travail, ainsi que les différentes techniques utilisées. La troisième partie rapporte les différents résultats obtenus, et tente de les discuter. Une conclusion générale, assortie de perspectives, une liste de références bibliographiques et des annexes complètent le document.

# **PREMIÈRE PARTIE : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

---

**Chapitre I : Notions de morphopédologie et de pédogéochimie**

**Chapitre II : Milieu d'étude**

# CHAPITRE I : NOTIONS DE MORPHOPÉDOLOGIE ET DE PÉDOGÉOCHIMIE

## Introduction

Ce chapitre vise à définir et à dégager l'importance des notions fondamentales de morphopédologie et de pédogéochimie.

### 1.1. Morphopédologie : définition(s), concepts généraux et intérêt(s)

#### 1.1.1. Définition(s)

La morphopédologie est une discipline dont l'approche, dans l'étude du milieu, est à la fois géomorphologique et pédologique. Cette approche, naturaliste, est considérée comme un exercice de cartographie.

La morphopédologie peut être vue dans le sens de la relation entre le relief et le sol. Dans ce cas, il sert à montrer le lien entre la morphogenèse et la pédogenèse. Elle permet ainsi, d'observer différents types de sols en fonction de la topographie et de comprendre que la naissance et l'évolution des sols sont dépendantes des reliefs (figure 1).

D'un autre côté, la morphopédologie peut être vue dans le sens du "*contenu-sol*", basé sur des éléments descriptifs (couleur, structure, texture, porosité, etc.), qui permettent de se rendre compte que les sols sont souvent affectés d'un gradient toposéquentiel et d'une forte variabilité spatiale. Dans ce cas, la nature de la roche peut jouer un rôle primordial dans l'évolution et la mise en place des sols.

#### 1.1.2. Concepts généraux de la morphopédologie

L'histoire de la morphopédologie, dans le monde francophone, remonte aux travaux de Kilian (1972) et de Bertrand (1972), et elle est initialement associée à des études de pédologie appliquée ou de cartographie des potentialités agricoles. En effet, selon Betard et Bourgeon (2009), c'est en 1972 que le terme morphopédologie a été employé pour la première fois dans deux articles scientifiques publiés par Kilian et Bertrand. Ceux-ci, à la lecture de leurs résultats, démontraient l'efficacité de la morphopédologie pour la réalisation rapide d'inventaires des sols tropicaux, débouchant sur l'évaluation des potentialités agricoles des terres en Afrique francophone, et préconisaient des conseils d'aménagement.

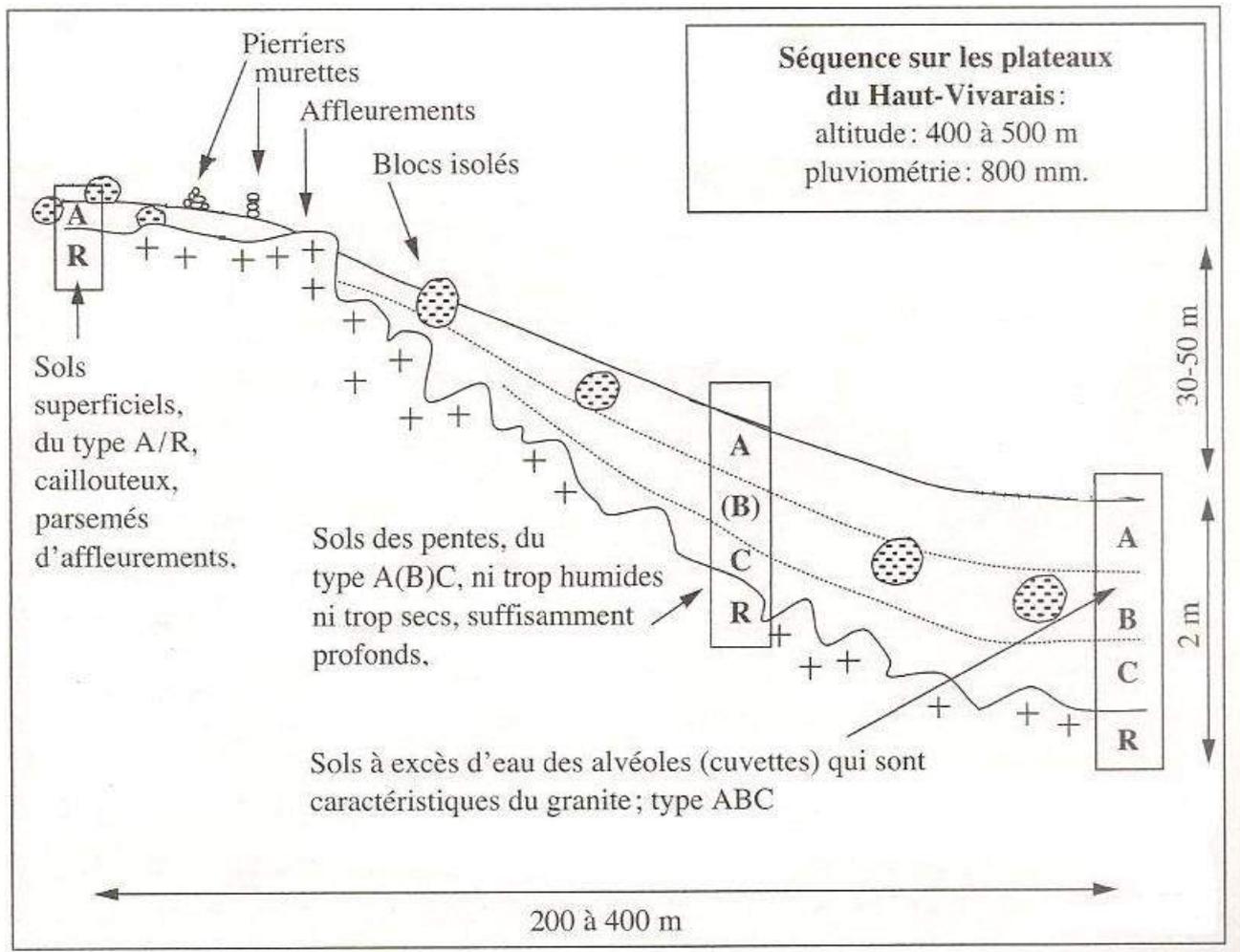


Figure 1 : Toposéquence des sols sur granite du Haut-Vivarais en France  
(Legros, 1973 modifié)

Pour Tricart (1974), qui s'est permis de faire un commentaire sur la question de la morphopédologie, tout comme, le réaffirme plus tard, Gaucher (1981), l'idée d'une appréciation morphopédologique a commencé à germer depuis que les photographies aériennes permettaient de voir, à la fois, la surface des sols et les formes du relief, indépendamment des découpages artificiels. On arrivait ainsi, à l'aide de cette approche de photo-interprétation, à analyser les milieux concernés, selon une échelle de stabilité basée sur les rapports entre morphogenèse et pédogenèse. Ce faisant, le développement (épaississement) des sols, s'apparentait aux milieux les plus stables sur lesquels s'exerçait une morphodynamique faible ou nulle, avec un bilan en faveur de la pédogenèse. Par contre, étaient liés aux milieux les plus instables, ceux pour lesquels le bilan penchait en faveur de la morphogenèse, donc vers l'amincissement des sols, voire leur disparition (Teissier, 1974 ; Thibout, 1974).

Plus tard, l'approche première de la morphopédologie, basée sur des études de pédologie appliquée et de cartographie des potentialités agricoles, s'est enrichie avec la prise en compte des notions de paysages morphopédologiques, d'unités morphopédologiques et de pédopaysage. Cette nouvelle approche cartographique intègre, bien entendu, dans la matérialisation numérique, les facteurs de genèse des sols (figure 2).

### **1.1.3. Intérêt(s) de la morphopédologie**

Parlant d'intérêt(s) de la morphopédologie, on peut dire, en tenant compte du contexte dans lequel elle a pris naissance, que l'objectif principal de cette discipline est d'offrir un échantillon d'aménagements possibles des sols, à des fins agricoles ou forestières, principalement, en fonction des contraintes de conservation des sols, mises en évidence.

La morphopédologie explique la nature du sol en fonction du modelé, du matériau originel, du régime des eaux, de l'occupation de l'espace, etc. Elle arrive ainsi, à définir, non plus le sol en soi, mais l'unité de paysage, et, permet de dire que les contraintes du milieu ne sont plus seulement celles du sol, mais celles du modelé (forme du relief), du régime des eaux, de la végétation qui l'accompagne, etc. (Raunet, 2008). Pour cette raison, comparée à la « simple » pédologie, elle constitue un progrès substantiel.

Plusieurs cas, basés sur des travaux scientifiques, permettent d'appréhender réellement l'importance de la morphopédologie.

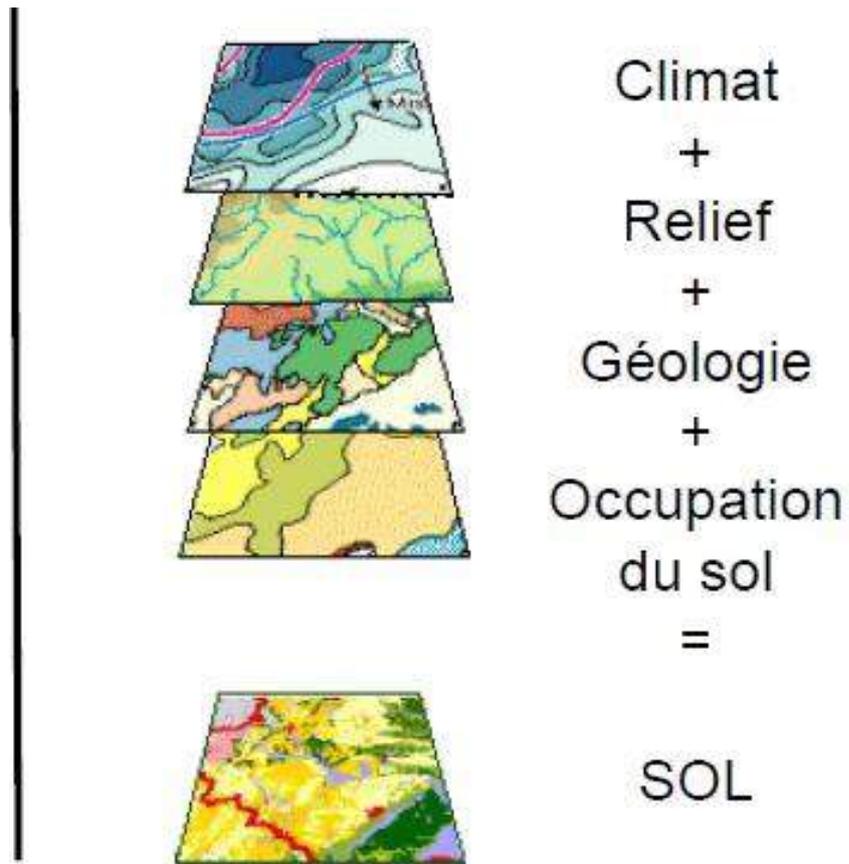


Figure 2 : Cartographie numérique des sols

Par exemple, Rossi (1989), indique qu'au Rwanda, l'évolution morpho-tectonique de l'ensemble de la région conditionne la stabilité ou l'instabilité des versants et des sols qui leur sont associés, et, qu'au Nord du Togo, il existe, pour chaque unité lithologique, une étroite dépendance entre sols et formes du relief. Il arrivait ainsi à démontrer que dans le monde tropical, la distinction entre géomorphologie et pédologie est souvent artificielle, et que les formes du relief se développent surtout aux dépens d'altérites et de sols. Le type de forme et sa dynamique conditionnent les sols qui leur sont associés, leur évolution, leur plus ou moins grande sensibilité à l'érosion. La morphopédologie constitue, de ce point de vue, un domaine de réelle interdisciplinarité.

Les travaux de Betard et Bourgeon (2009), permettent de comprendre comment la cartographie morphopédologique est utilisée aujourd'hui, comme outil scientifique, pour améliorer les connaissances géomorphologiques d'une région. Pour ces auteurs, il est donc important de tenir compte du composant sol en géomorphologie.

## **1.2. Notion de Pédogéochimie**

### **1.2.1. Définition**

De façon littérale, on peut définir la pédogéochimie comme étant la « géochimie du sol » ou plutôt, l'étude de la distribution, de la répartition des éléments chimiques présents dans les sols, des lois de leur comportement chimique, ainsi que de leur quantité. Elle permet ainsi de reconnaître les environnements dynamiques des sols et d'identifier des caractéristiques géochimiques propres aux unités associées à la minéralisation.

### **1.2.2. Concept et processus**

Le concept de la pédogéochimie ne peut être isolé de celui de la pédologie et de la géochimie. Ainsi, Le terme « pédogéochimie » a comme composantes, le « sol » et la « géochimie », d'où la pédogéochimie tire sa source.

Les « sols », pour les géologues, sont des formations naturelles, continues, tridimensionnelles relevant de la géologie (Calvet, 2003). Les sols résultent donc, de l'altération des roches et de leur évolution autonome, sous l'action de facteurs climatiques, biologiques et anthropiques. Ces formations naturelles, appelées « couvertures pédologiques », constituent l'interface entre l'atmosphère, la biosphère et la lithosphère (Gobat *et al.*, 2003). Les processus d'altération des

roches, intégrant la dégradation physique et la transformation chimique (Pomerol et Renard, 1998 ; Campy et Macaire, 2003 ; Parriaux, 2006), aboutissent à faire revenir la roche à l'état de terrain meuble. Cette altération peut agir sur la structure physique de la roche (figure 3), ne changeant pas ainsi la composition chimique, mais modifiant les rapports surface/volume (figure 4).

En revanche, l'altération chimique modifie la composition chimique, en agissant sur la minéralogie de la roche (figure 5). Dans l'exemple de la figure 5, l'altération de l'orthose par l'eau, aboutit, à la fin, à la formation de nouveaux minéraux (minéraux argileux).

Quant à la « géochimie », elle concerne les milieux minéraux et, elle a introduit, au 19<sup>ème</sup> siècle, la chimie dans l'étude des phénomènes globaux mis en œuvre au cours de l'histoire de la Terre. Elle traite de la répartition des éléments chimiques dans la géosphère (minéraux et roches) (Goldschmidt, 1958), et constitue une discipline incontournable des géosciences (Jambon et Thomas, 2009). Son action consiste, essentiellement, en l'application des lois de la chimie minérale aux processus géologiques, qui séparent ou rassemblent les différents éléments chimiques constituant la planète. Elle étudie la circulation des différents éléments de la classification périodique au sein de la géosphère, en application des lois classiques de la chimie inorganique. La géochimie caractérise l'évolution minérale qui concerne les relations roches-altérites se développant au sein des niveaux superficiels, situés au contact des milieux biotiques (géochimie de surface) (Millot, 1963 ; Pedro, 1966).

En mobilisant sur place les éléments de la roche-mère, l'altération, à l'origine des sols, concentre certains éléments (Al, Ni, Fe, Mn, U, etc.) comme minerais (Pomerol et Renard, 1998). Ainsi donc, en plus de former les sols, l'altération est un mécanisme de tri géochimique. Dans le cas de l'action de l'eau, agent majeur de l'altération chimique des roches, se comportant comme un dipôle, dont la force d'attraction vis-à-vis d'un ion quelconque détermine sa solubilité, on s'aperçoit que cette force d'attraction dépend du potentiel ionique :  $PI = e/r$ , rapport entre la charge (e) et le rayon ionique (r). Par conséquent, en fonction des différentes valeurs du potentiel ionique, Goldschmidt détermine, dans son diagramme (figure 6), trois (3) grands domaines :

**- Domaine des cations solubles (cations basiques) :** ici le potentiel ionique  $PI < 3$ . La faible charge de ces cations attire les dipôles d'eau, et, les cations, tels, Na et Ca, entrent en solution. Dans ce domaine, existent également des cations anti-stokes (Cs, Rb, K), dont le  $PI < 1$ , qui sont moins mobiles au cours de l'altération ;

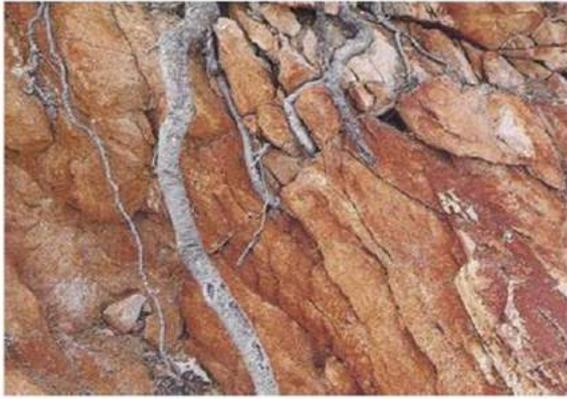


Figure 3 : Altération physique avec éclatement de la roche

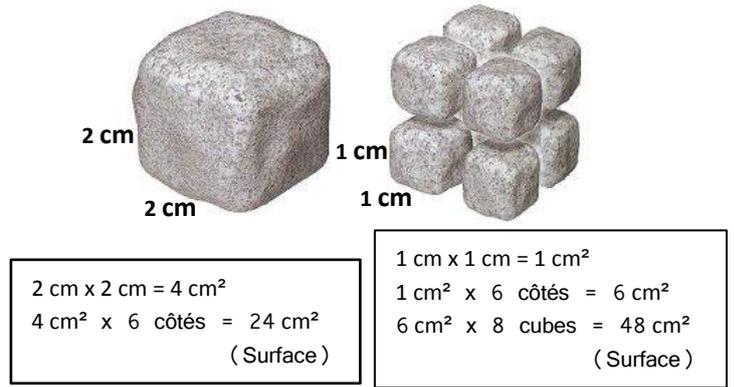


Figure 4 : Expression de la modification du rapport surface/volume

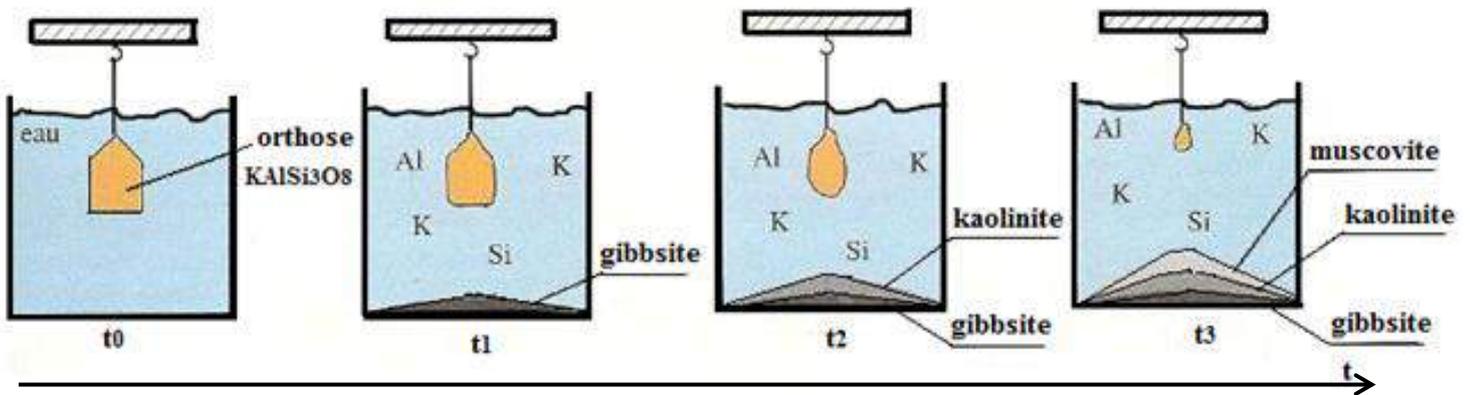


Figure 5 : Étapes de la dissolution incongruente de l'orthose

En  $t_0$ , un cristal d'orthose est mis en contact avec de l'eau. En  $t_1$ , l'altération de l'orthose conduit à la mise en solution des ions Si, Al et K ; simultanément, la gibbsite  $Al(OH)_3$  précipite. L'altération se poursuit ( $t_2$ ) et la kaolinite précipite à son tour. Dans un stade final ( $t_3$ ), la muscovite se forme enfin.

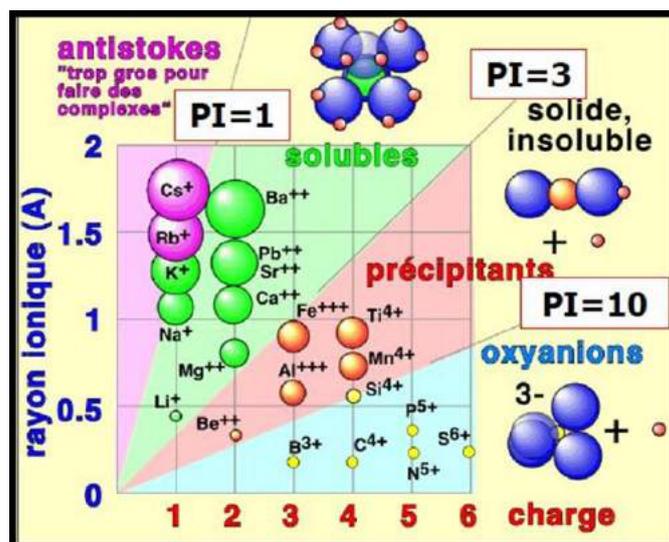
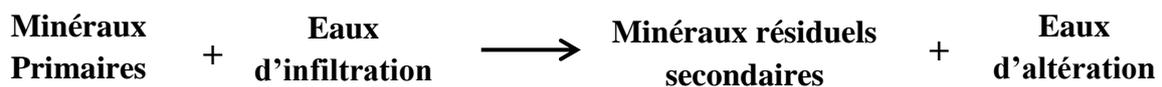


Figure 6 : Diagramme de Goldschmidt

- **Domaine des précipitations d'hydroxydes** :  $3 < PI < 10$ . Les cations sont plus attractifs, créant la rupture du dipôle. Ici, les cations précipitent à l'état d'hydroxydes insolubles à l'origine des gîtes métallifères résiduels ;

- **Domaine des oxyanions solubles** :  $PI > 10$ . Du fait du potentiel ionique élevé, l'ion exerce une forte attraction sur l'oxygène, provoque la rupture du dipôle et la libération d'ions  $H^+$ . C'est par exemple le cas de  $CO_3^-$  et de  $SiO_2$ . Ces considérations expliquent que l'hydrolyse des silicates conduit au départ de  $SiO_2$  et des cations basiques, tandis que  $Al_2O_3$  précipite.

Ainsi, de façon schématique, on peut considérer que le phénomène d'hydrolyse des minéraux primaires des roches aboutit à la formation d'une phase insoluble, constituée de minéraux résiduels et de minéraux secondaires :



Les minéraux résiduels peuvent être constitués de quartz, feldspath potassique, micas, tandis que les minéraux secondaires se composent de phyllosilicates, d'oxydes et d'hydroxydes de fer (Fe), d'aluminium (Al), de manganèse (Mn), de carbonates, de sulfates.

De façon générale, les éléments minéraux essentiels d'un sol sont les argiles, les carbonates et les oxydes (Pomerol et Renard, 1998), qui sont les résidus d'altération. Ces résidus peuvent être des concentrations relatives, absolues ou de néoformations (Legros, 2007).

### 1.2.3. Fond géochimique et fond pédogéochimique

La question du fond géochimique est à appréhender selon que les éléments chimiques initiaux des substrats géologiques rocheux ou meubles, soient modifiés ou non.

Ainsi, pour Perreira et Sonnet (2007), l'existence naturelle initiale des éléments chimiques dans les matériaux géologiques compose le fond géochimique, tandis que Baize (2009) l'apprécie en considérant que les compositions initiales des matériaux géologiques peuvent être très localement modifiées par des minéralisations post-formation ou post-sédimentation

et, à la fin, offrir une composition chimique, fruit du résultat de toute leur histoire géologique sur des millions d'années.

Dans tous les cas, le fond géochimique fait référence à la composition chimique de la roche. Cependant, lorsqu'un sol se forme, et naturellement au dépens de la roche-mère primaire ou secondaire, la composition chimique de cette roche-mère (fond géochimique) se trouve conséquemment modifiée. De plus, ce sol, issu de la pédogenèse, peut recevoir des apports d'origines naturelles externes telles que les retombées d'éruptions volcaniques. L'ensemble, composé du fond géochimique modifié et des retombées atmosphériques naturelles, en dehors de tout apport d'origine anthropique, constitue le fond pédogéochimique naturel.

Selon Baize (1997 ; 2009) le fond pédogéochimique naturel est la concentration d'un élément chimique dans un sol (que ce soit un élément majeur ou un élément en traces), résultant des évolutions naturelles, géologiques et pédologiques, en dehors de tout apport d'origine humaine. Pour cet auteur, comme pour Pereira et Sonnet (2007), Bur (2008), le fond pédogéochimique naturel, pour un élément donné, dépend d'abord, étroitement, de la composition du matériau géologique dont le sol est issu (matériau parental ou roche-mère). Mais, par la suite, au fur et à mesure de l'action des processus pédogénétiques, le fond pédogéochimique naturel va se distinguer du «fond géochimique» local initial, et se diversifier, à la fois verticalement et horizontalement, d'un horizon à un autre, en fonction du jeu relatif des altérations, des lixiviations, des migrations, des redistributions et des éventuelles concentrations de matières. On considère ainsi les teneurs de ce fond, comme les « teneurs naturelles » du sol. Mais, l'effet cumulé, au fil du temps, des apports anthropiques (pratiques agricoles, contaminations locales, retombées atmosphériques d'origine humaine, etc.) ne permet plus, dans la pratique, de retrouver ces sols naturels et, en l'absence d'une véritable contamination locale, les teneurs mesurées dans ces sols seront désignées sous le vocable de « teneurs habituelles ».

Les contaminations peuvent être locales, touchant des aires relativement faibles (apports massifs des zones d'exploitation minière, d'installation industrielle, etc.) ou diffuses, affectant les sols de manière généralisée (retombées atmosphériques, pratiques agricoles, boues de station, boues d'épuration, etc.). La figure 7, montre un aperçu de l'appréciation entre la contamination locale et la contamination diffuse.

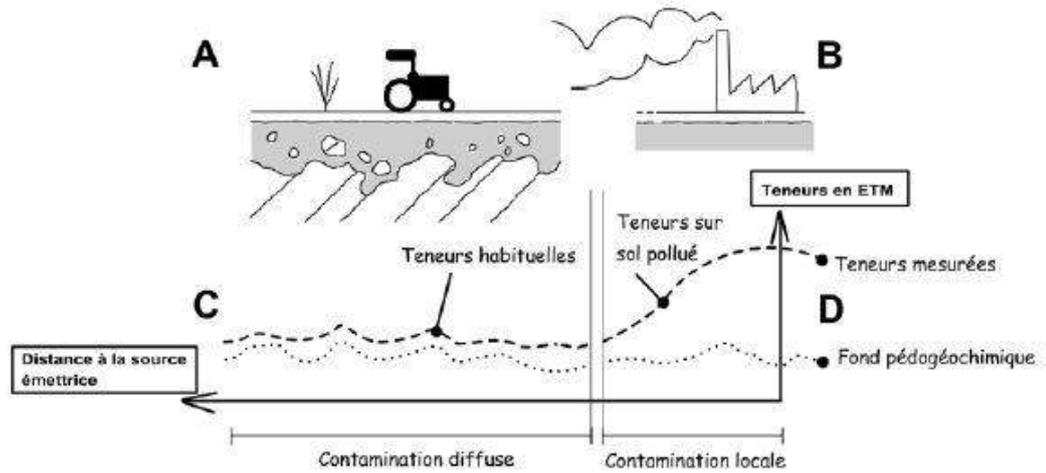


Figure 7 : Appréciation entre la contamination diffuse et la contamination locale  
(Perreira et Sonnet, 2007)

(A) : représente l'exemple d'un sol se formant sur un matériau parental (en grisé), développé sur des roches du substrat géologique. (B) : sur le même sol, présence d'une source d'émission massive de polluants. (C) : en pointillé, le fond pédogéochimique naturel qui serait présent en l'absence de contamination diffuse. En tireté, les teneurs mesurées dans le sol, qui sont qualifiées « d'habituelles » car on ne peut pas deceler l'influence d'une contamination locale. (D) : en tireté, les teneurs mesurées sont qualifiées de teneurs sur sol pollué parce qu'elles ont un niveau élevé résultant d'une contamination locale du sol.

#### 1.2.4. Éléments traces métalliques

Les éléments chimiques concentrés, constituant le fond géochimique ou le fond pédogéochimique, sont, soit des éléments majeurs, soit des éléments en trace, ou les deux, simultanément.

Les éléments traces sont les soixante-huit (68) éléments minéraux, constituants de la croûte terrestre, dont la concentration est, pour chacun d'eux, inférieure à 0,1 % (Alloway, 1995 ; Baize, 1997) et ne représentent que 0,6 % du total des éléments. L'expression « éléments traces métalliques » (ETM) renvoie aux métaux ayant une densité atomique supérieure à 6 g.cm<sup>3</sup>, présents à l'état de traces, tels le Cadmium (Cd), le Chrome (Cr), le Cuivre (Cu), le Nickel (Ni), le Plomb (Pb), le Zinc (Zn), etc.

Les ETM sont naturellement présents dans les sols en faibles quantités et, sont, en partie, libérés lors de l'altération de la roche mère (Bourrelier et Berthelin, 1998). La plupart d'entre eux présente la double propriété d'être, à la fois, des oligo-éléments et des éléments toxiques (Doelsch, 2004). D'après Colinet (2003) et Balabane (2006), les sols se comportent, de façon générale, comme des accumulateurs des ETM. Ils y ajoutent que la rétention ou la mobilisation d'un ETM dans un sol est fonction de plusieurs facteurs, et diffère selon l'élément considéré, ainsi que selon le type de sol. Plus tard, Pereira et Sonnet (2007) indiquent que les ETM, lorsqu'ils sont présents dans les sols, sous certaines formes et à certaines concentrations, peuvent présenter des risques pour l'environnement et la santé humaine.

Ces dangers pour l'environnement, décrits aussi par Rattan *et al.* (2005), Denaix (2007), tirent leur fondement du fait que les ETM ne sont pas biodégradables (Bur, 2008), et que le comportement accumulateur des sols vis-à-vis des ETM est irréversible (Markus et Mabratney, 1996 ; Dère, 2006 ; Lamy, 2006). D'après El Hamiani *et al.* (2010), l'activité anthropogénique, telle que l'utilisation d'engrais phosphatés, les effluents provenant de l'industrie minière et les boues des stations d'épurations des eaux usées, constituent la principale source de contamination par les métaux lourds dans l'environnement.

Concernant l'industrie minière, les différentes opérations d'excavation, de transport, de broyage, de fusion du minerai et de rejet des effluents, contribuent énormément à la contamination environnementale (Dudka et Adriano, 1997; Navarro *et al.*, 2008). Ainsi, dans les régions de fortes activités minières, plusieurs constats ont été faits, marqués par la contamination ponctuelle en métaux lourds (Braungardt *et al.*, 2003 ; Blowes *et al.*, 2004 ; Figueira et Ribeiro, 2005). C'est le cas, par exemple, du district minier du Rocky aux États-

Unis où, Younger *et al.* (2002) soutiennent que le drainage minier constitue un problème environnemental qui dure depuis plusieurs dizaines d'années. Casiot *et al.* (2004) indiquent, eux aussi, que les effluents formés dans le cadre des drainages miniers acides (DMA), sont très riches en sulfates (jusqu'à 4,9 g/l), généralement, en fer (jusqu'à 1,7 g/l), et contiennent des concentrations élevées en métaux toxiques (Pb, Cd, Zn, Tl, ...) ou métalloïdes (As, Sb). Ces exemples sont encore appuyés par Sebei *et al.* (2005), qui soulignent que les rejets de la laverie de la mine du Boujaber, en Tunisie, conduisent à des teneurs élevées en Pb, Zn et Cd, dans les sols de cette région. Des résultats similaires ont été trouvés au British Columbia (Desbarats *et al.*, 2011), au Saskatchewan (Shaw *et al.*, 2011), deux régions du Canada, avec des contaminations fortes en As, Pb, Mo, Ni et Se dans les effluents miniers.

Que les régions soient des régions arides, semi-arides, humides ou glaciaires, le constat reste le même, que l'exploitation minière demeure une source de concentration en ETM dans l'environnement (sol, eau, air, plante). On pourra, en plus des exemples cités plus haut, en relever d'autres, décrits par les chercheurs comme Azapagic (2004), Gómez-Álvarez *et al.* (2004), Miller *et al.* (2004), Qiu *et al.* (2005, 2006a, 2006b), Ramos Arroyo et Siebe (2007), Li *et al.* (2008), Arcega-Cabrera *et al.* (2009), Gómez-Álvarez *et al.* (2008; 2012), Bech *et al.* (2012), Qiu *et al.* (2012), Salinas Villafane *et al.* (2012).

### **Conclusion partielle**

Quelques notions de base sur la morphopédologie et la pédogéochimie ont été indiquées dans ce chapitre, qui ont permis de comprendre d'une part, qu'il y a un lien entre les sols formés et le relief, et, d'autre part, que l'altération des roches produit le sol et libère des éléments chimiques. Elles indiquent, qu'à chaque position topographique se dresse un type de sol, et que les éléments chimiques (ETM) sont source de pollution environnementale, surtout en contexte minier.

## **CHAPITRE II : MILIEU D'ÉTUDE**

### **Introduction**

La zone Centre-Sud de la Côte d'Ivoire est la vaste région dont une des localités (Tokréyaokro) a servi aux travaux de recherche de cette thèse. Le présent chapitre traite des considérations générales de cette région et, plus particulièrement du secteur du Blafo-Guéto (Tokréyaokro), à Toumodi, pour une meilleure compréhension et une appréciation des cadres géographique, géologique, hydrologique, climatique, pédologique et économique.

### **2.1. Généralités sur la région d'étude**

#### **2.1.1. Cadre géographique**

La région d'étude se situe en Côte d'Ivoire, un pays d'Afrique occidentale. La Côte d'Ivoire se localise dans l'hémisphère Nord, entre le tropique du cancer et l'équateur, comprise entre 5° et 10° de latitude Nord, et 2° et 9° de longitude Ouest. Le territoire de la Côte d'Ivoire comprend trois (3) grandes régions biogéographiques ou écozones (Yao-Kouamé, 2008) (figure 8), où l'on distingue, dans la partie nord du pays, l'écozone savanicole ; dans la partie sud, l'écozone forestière, et, dans la partie centrale, l'écozone de contact forêt-savane. C'est dans cette écozone de contact forêt-savane, que se situe la région d'étude. La zone de contact forêt-savane, telle que définie par N'Guessan (1990), couvre les régions de Toumodi, Dimbokro et Yamoussoukro, et s'étend sur une superficie d'environ 632 km<sup>2</sup>, entre les fleuves Bandama, à l'Ouest, et Nzi, à l'Est. La partie plus au Sud de cette zone, ou zone centre-sud, dont fait partie la région de Toumodi, a la forme d'un saillant, constituant une échancrure de savane ouverte dans la forêt dense, et formant un «V», couramment appelé «V baoulé» (Verheye, 1972 *in* Leblond, 1984).

#### **2.1.2. Contexte climatique**

La Côte d'Ivoire, de par sa situation géographique, est un pays de la zone intertropicale, c'est-à-dire de la zone à climat chaud et humide. Comme pour l'ensemble de la zone chaude, si la chaleur est le point commun, en Côte d'Ivoire, l'humidité intervient pour apporter des subdivisions dont rendent bien compte les types de régimes définis.

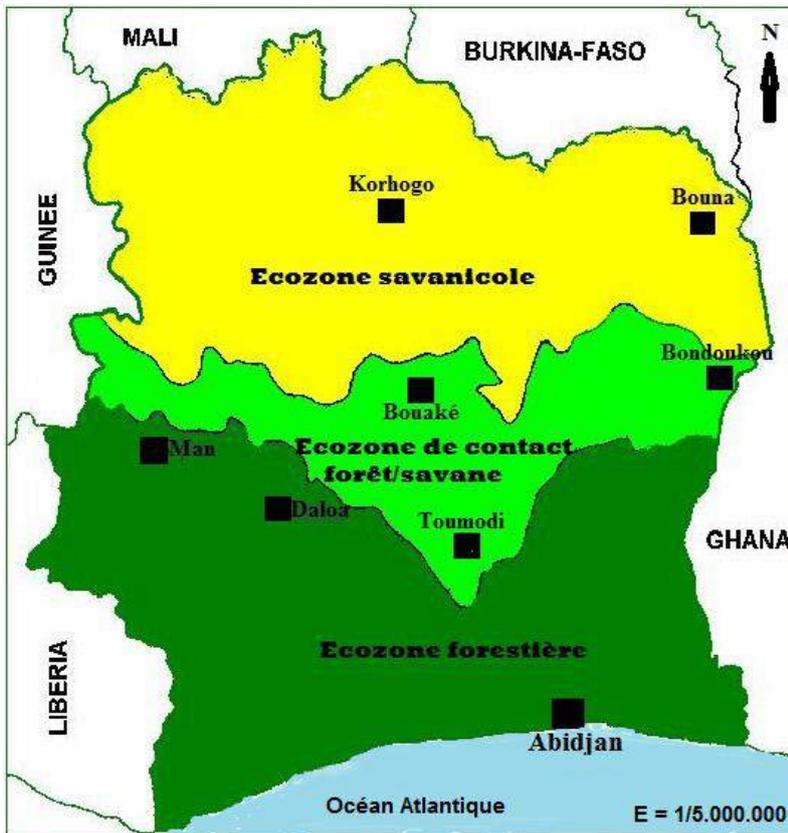
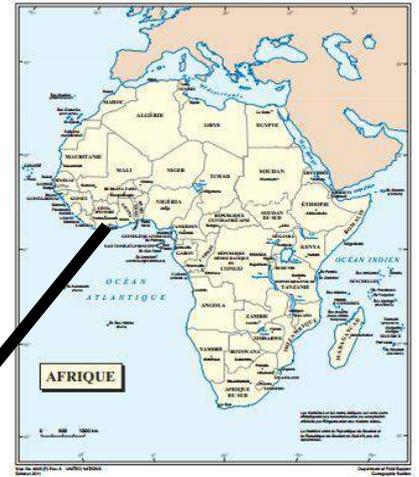


Figure 8 : Cadre géographique de la Côte d'Ivoire avec différentes écozones  
(in Yao-Kouamé, 2008)

La zone d'étude est soumise au climat équatorial de transition atténué (climat baouléen), entre les climats de type guinéen et de type soudanien (Leblond, 1984 ; N'Guessan, 1990).

Ainsi, quatre (4) saisons de pluie déterminent, sur toute l'année, une quantité de pluviométrie moyenne générale, variant de 1000 mm à 1200 mm. Ces saisons s'alternent selon un schéma comprenant :

- une grande saison des pluies, de mars à juin ;
- une petite saison sèche (baisse des précipitations), en juillet et en août ;
- une petite saison des pluies, en septembre et en octobre ;
- une grande saison sèche, de novembre à mars.

Ces saisons sont sous l'influence de la mousson du Sud-Ouest et de l'harmattan. La température, dans cette écozone, est plutôt caractérisée par les uniformités et une faible amplitude, avec une moyenne d'environ 26 °C. Quant à l'humidité, elle varie entre 75 et 85% avec des chutes à 40% en période d'harmattan (vent sec et dominant), et entre 80 et 85% en période pluvieuse (BNETD, 2001).

### **2.1.3. Végétation**

La région du Centre-Sud de la Côte d'Ivoire, définie comme une zone de contact forêt-savane, est à végétation constituée d'une mosaïque de savane guinéenne et de forêt dense humide semi-décidue. En effet, elle marque la transition entre les régions de savane, plus au Nord et le Sud forestier, avec la particularité que la savane s'enfonce dans la forêt suivant un golfe célèbre, en forme de V (le « V baoulé »). Dans ces conditions, la végétation est le reflet de cette transition, dominée par une savane arborée, à forte densité arbustive, présentant des îlots forestiers (forêts mésophiles), par endroits, ainsi que des galeries forestières le long des cours d'eau (Véhi, 2001 ; Yao-Kouamé, 2008).

Le secteur mésophile, situé au Sud, est caractérisé par la forêt dense humide semi décidue, de type *Celtis spp. Triplochiton scleroxylon* et type à *Aubrevillea kerstingii* (Géomines, 1982 ; N'Guessan, 1990). À l'Ouest, on a une végétation arborée, relativement homogène, sans limite apparente entre les forêts galeries et les interfluves boisés. Vers l'Est, la végétation des interfluves est très clairsemée, et est représentée par une savane arbustive ou une savane à rôniers (*Borassus aethiopium*). On rencontre, également, dans la région, des zones de reboisement à espèce unique, de *Tectona grandis*.

#### **2.1.4. Relief**

Le relief de la Côte d'Ivoire, selon Avenard *et al.* (1971), est peu tourmenté et représente le « triomphe de l'horizontalité ». Ce relief est celui d'une pénéplaine dont l'altitude varie de 400 m environ au Nord, à moins de 50 m au Sud, entrecoupée de chaînes de collines orientées NNE-SSW. Dans tous les cas, le relief de la Côte d'Ivoire comprend, un secteur plus élevé, à l'Ouest, autour de Man (allant jusqu'à 1000 m d'altitude), un secteur plus affaissé, au Sud, dans la région des lagunes. Mais, dans l'ensemble, la majeure partie du modelé est ondulée, caractérisée par une succession de collines subaplanies et, en définitive, très monotones, bien que, parfois, entrecoupées de reliefs résiduels plus élevés.

Cette uniformité d'ensemble, marquée par des nuances dans le détail, qui sont donc les traits caractéristiques des reliefs de Côte d'Ivoire, est bien celle de la région d'étude, dans la grande échancrure du « V Baoulé ». En effet, dans cette zone, on aperçoit des niveaux de bas glacis, qui s'abaissent jusque vers moins de 100 m, avec une importance relative des reliefs dominant le paysage. Cette série de reliefs comprend la chaîne dite, « *chaîne baoulé* », s'étendant du mont Kokumbo, jusqu'à Fétékro, suivant la direction birimienne (NNE-SSW), et ceux dits « *reliefs tabulaires* ». Témoins des surfaces d'érosion plus anciennes, ces reliefs tabulaires correspondent à l'Orumbo-Boka, au mont Dido, au Kokumbo, au Blafo-Gueto, aux principaux sommets du Yaouré. Ils constituent les points culminants et dominants du pays baoulé (450-500 m).

#### **2.1.5. Cadre géologique général**

La géologie de la Côte d'Ivoire est, en majeure partie, constituée d'un socle d'âge précambrien, métamorphisé et induré; surmonté d'un bassin peu étendu, d'âge secondaire à quaternaire, localisé au Sud du pays, le long de la côte atlantique. Ce socle est constitué du domaine protérozoïque (domaine oriental) et du domaine archéen (domaine occidental), comprenant, essentiellement, des roches archéennes, séparées par la faille de Sassandra. C'est au domaine protérozoïque, qu'appartient la région d'étude, dans l'aire éburnéenne (figure 9), située entre 2500 et 1600 Ma (Bonhomme, 1962). Dans cette partie du domaine, de type géosynclinal, les formations sont orientées NNE-SSW, suivant les sillons volcano-plutoniques et volcano-sédimentaires, bordées par des massifs de granitoïdes (Yacé, 1982). Ces sillons sont constitués de métavolcanites, de gabbros, de dolérites, de formations pelitiques, et, sont, pour certains, une ceinture de roches vertes, pour d'autres, un bassin sédimentaire (Poucllet *et al.*, 1996 ; Dombia, 1997).

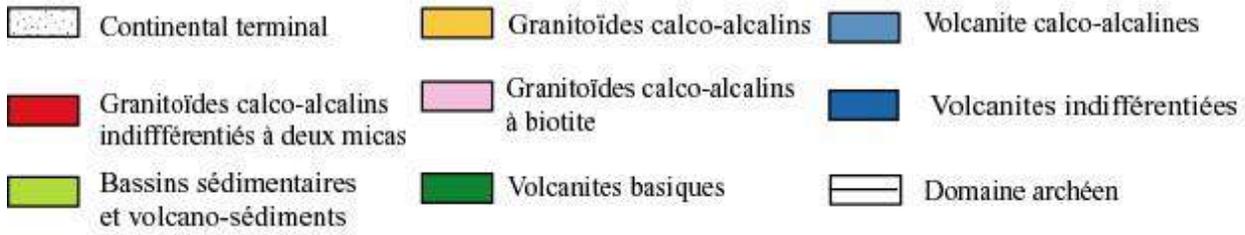
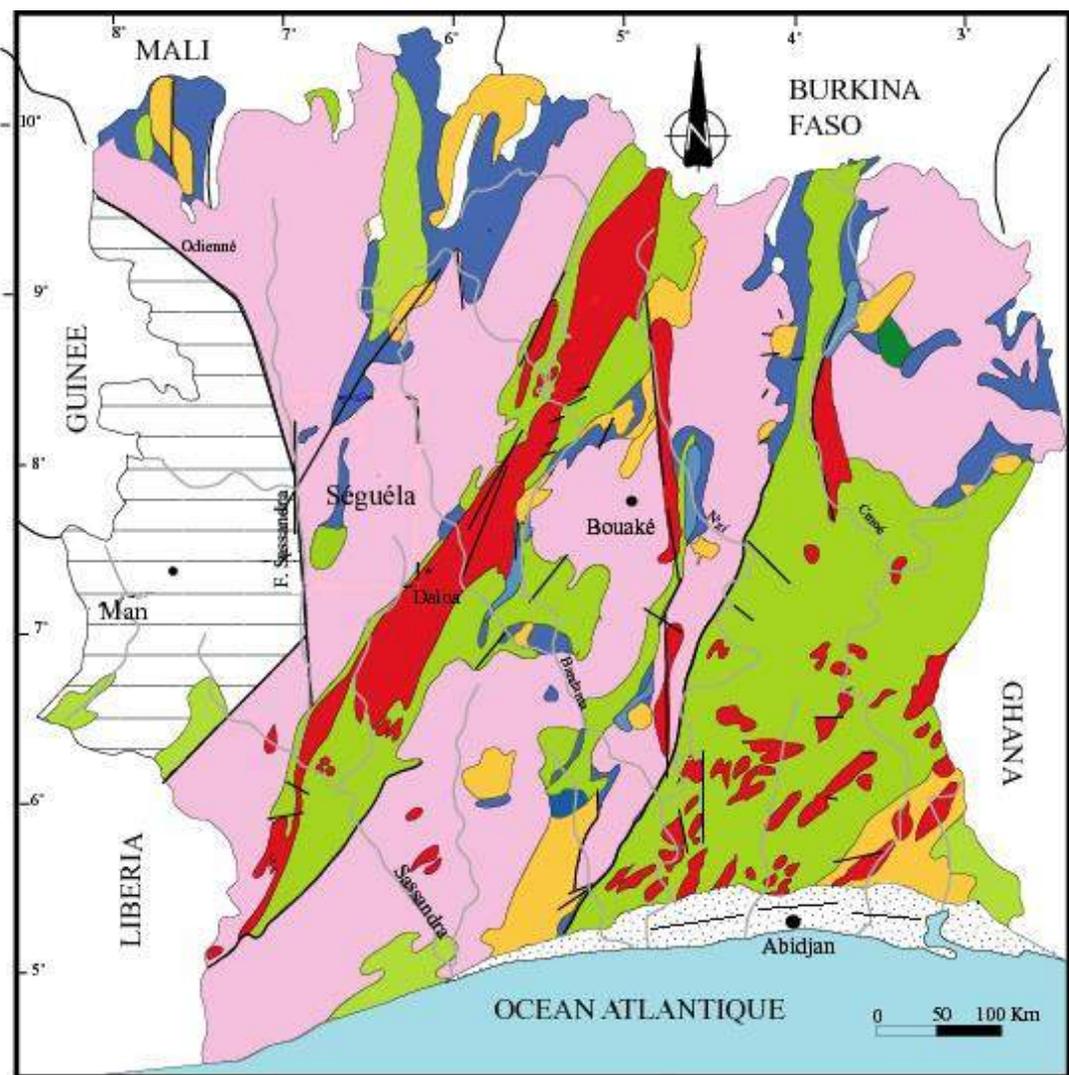


Figure 9 : Carte géologique simplifiée montrant la répartition des formations géologiques de Côte d'Ivoire (d'après la carte de Tagini, 1971, modifiée)

### **2.1.6. Cadre pédologique**

L'existence de différents types de sols a été démontré en Côte d'Ivoire et, une des curiosités a été la découverte de sols brunifiés développés sur les formations volcano-sédimentaire du Centre du pays (figure 10). Ceci, a même amené Duchaufour (1977) à dire que la présence des sols bruns dans ce secteur faisait l'originalité de la chaîne de Hiré-Fêttekro, incluant Toumodi. Outre, les sols bruns, on note la présence de sols ferrallitiques (ferralsols) développés sur roche-mère granitique, en zone de forêt, de sols hydromorphes (gleysols), en bordure des cours d'eau, dans les bas-fonds et dans les zones à écoulement difficile, de sols ferrallitiques, plus ou moins indurés (plinthic ferralsols), des chaînes de collines (Avenard *et al.*, 1971). La présence de ces sols brunifiés, issus de matériau non calcaire, a donc constitué une certaine curiosité scientifique, et a amené certains chercheurs à s'y intéresser. On a donc pu comprendre par la suite, grâce à Yao-Kouamé (2008), que ces sols brunifiés sont essentiellement marqués par des processus pédogénétiques de remaniement et de rajeunissement. Yoboué *et al.* (2010), soutiennent que ces sols brunifiés sont formés sur une zone à pétrographie complexe, composée de roches basiques, auxquelles se mêlent des roches acides.

### **2.1.7. Contexte hydrographique**

Le bassin du Bandama arrose toute la région, avec des affluents et confluents telles les rivières Kan, N'Zi, etc. (Konaté, 1998), qui coulent du Nord vers le Sud. Les bassins de ces cours d'eau constituent de vastes plaines et de nombreux barrages hydroélectriques ont été construits dans la région. Dans l'ensemble, le réseau hydrographique présente un aspect polygonal (Leblond, 1984 ; Faillat, 1987) et, cet aspect est plus marquant dans les zones de savane que dans les zones forestières.

### **2.1.8. Activités économiques**

Selon l'Agence Nationale d'Appui au Développement Rural (ANADER, 2002), les activités économiques dans la région du Centre-Sud de la Côte d'Ivoire concernent les activités agropastorales, le commerce et le tourisme. Les activités agricoles occupent plus de 90% de la population active, et les principales cultures sont les cacaoyers et les caféiers. À celles-ci, s'ajoutent les vivriers (igname, banane, manioc, maïs, riz) et les maraîchers (tomate, laitue, choux,..).

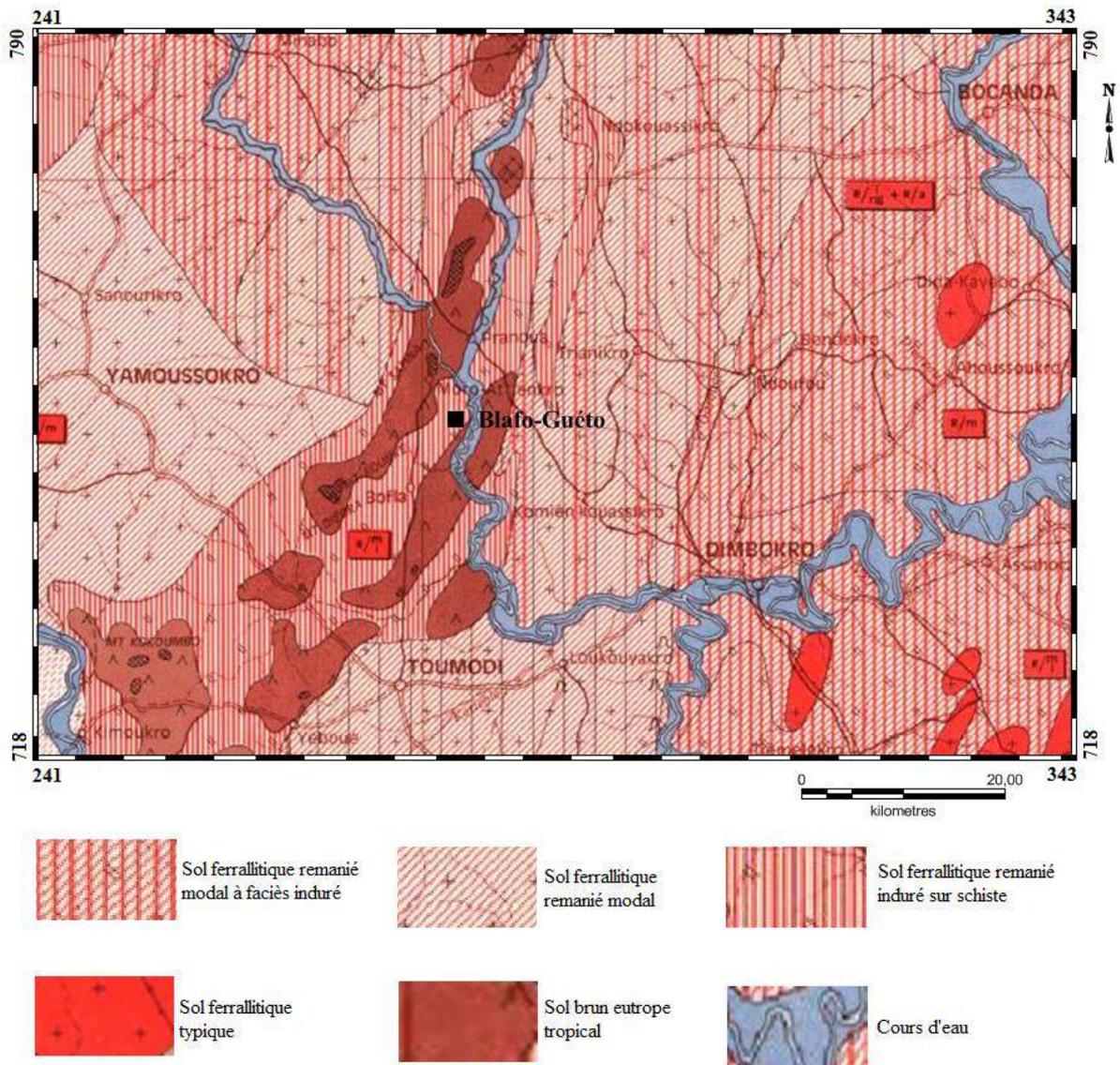


Figure 10 : Carte des sols du Centre de la Côte d'Ivoire (d'après la carte de Avenard *et al.*, 1971)

C'est une activité agricole, dominée par des exploitations familiales de type traditionnel, itinérants, sur brûlis, utilisant des outils archaïques (dabas, machettes) et les feux de brousse. L'élevage, dans cette région, y est bien développé, avec des fermes avicoles, des élevages de porcins, de bovins, d'ovins, de caprins, de volaille de basses-cours, etc.

L'activité commerciale y est dense, avec l'implantation d'unités agroalimentaires, d'industrie du textile, et, le potentiel touristique y est considérable. On a le cas du parc d'Abokouamékro à Toumodi (Tokréyaokro), et la basilique à Yamoussoukro (réplique de celle de Rome), qui suscitent beaucoup de visites.

De plus, une importante activité minière, pour l'exploration aurifère (Au) et manganésifère (Mn) est actuellement développée dans la localité de Tokréyaokro, sur les collines Blafo et Guéto, les prospectes de lauren hill, jimmy walker, pranoi, au niveau de la région de Toumodi. La présence d'anciens travaux de mines à Kahankro montre que les populations de cette contrée ont exploité l'or de façon artisanale à une certaine époque (Yoboué, 2005 ; Yao-Kouamé, 2008).

## **2.2. Caractéristiques spécifiques du site d'étude**

### **2.2.1. Localisation**

L'étude a été menée dans la localité de Tokréyaokro, sur les collines Blafo et Guéto (figure 11). Le village de Tokréyaokro est à 6°48'N et 4°58'O, à une altitude de 415 m au-dessus du niveau de la mer, et fait partie de la région de Toumodi. Il est, plus au Nord de Toumodi, particulièrement surplombé par les hautes collines du Blafo et du Guéto.

### **2.2.2. Morphologie du paysage**

Le contexte géomorphologique dans la localité est dominé par la présence des deux grandes collines Blafo et Guéto, avec l'existence de moyen et haut-glacis. Le plus haut sommet est autour de 501 m, avec, pour le cas de la colline Blafo, d'Est en Ouest, une altitude variant de 100 à environ 450 m. Cette localité de la région du Blafo-Guéto conserve la marque de surfaces et de systèmes d'aplanissement étagés, avec un niveau bauxitique intermédiaire, déterminant le modelé des reliefs et, un haut et moyen-glacis, déterminant celui des plaines (Grandin, 1976).

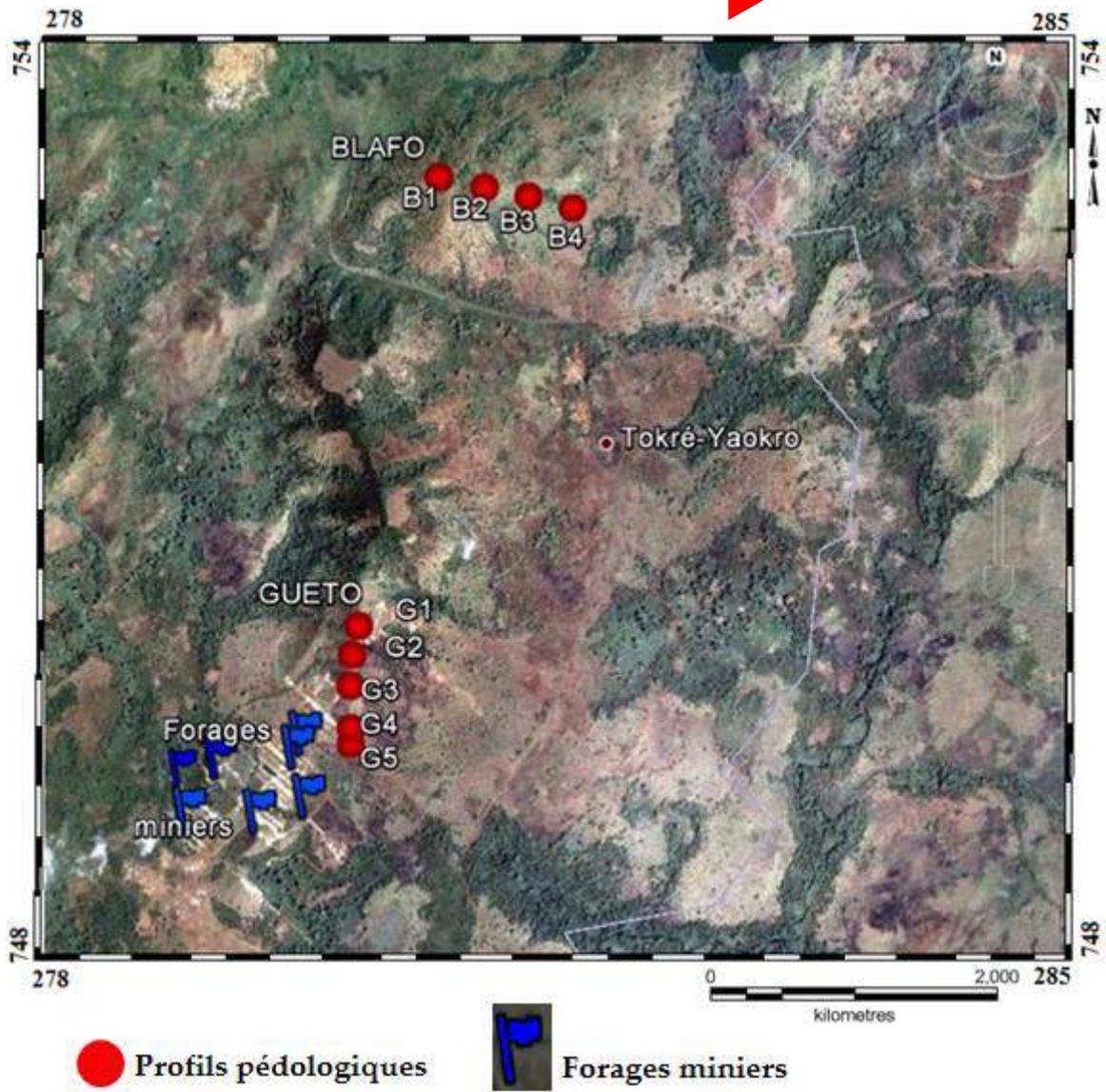
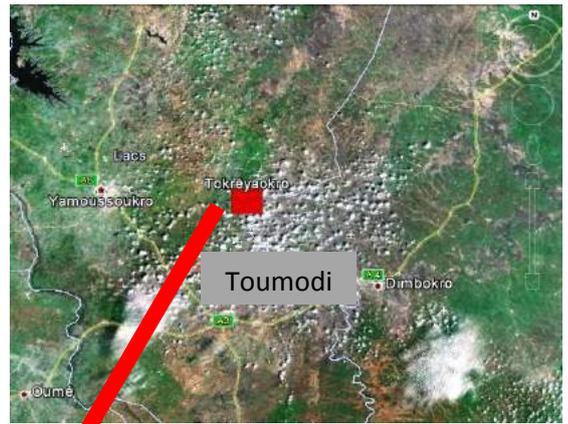


Figure 11 : Localisation du site de l'étude

### **2.2.3. Contexte géologique local**

D'après les travaux de Grandin (1976), la région du Blafo-Guéto comprend trois (3) domaines géologiques dont les limites suivent la direction birimienne NNE-SSW (figure 12). Le premier domaine, situé au centre, au niveau des collines Blafo et Guéto, comprend les formations du complexe volcano-sédimentaire birimien. Le deuxième domaine est constitué de granites et de migmatites éburnéens, situé de part et d'autre du premier domaine, au Sud-Est et au Nord-Ouest. Quant au troisième domaine, il est constitué des schistes arkosiques (flyschs birimiens), qui limitent la région à l'Est et, où s'inscrivent les méandres du N'Zi. Au niveau du domaine volcano-sédimentaire, sur les flancs des collines Blafo et Guéto, sont rencontrés des métasédiments. Dans l'ensemble, les formations rencontrées dans ce sillon sont des schistes, des grès, des quartzites, des conglomérats, des brèches, des roches basiques et acides, tous faiblement métamorphisés.

### **2.2.4. Types de sols**

Les sols rencontrés dans la localité, tels qu'indiqués par les travaux de Yao-Kouamé *et al.* (2011), réalisés au Blafo, sont des sols bruns eutrophes. Ils sont évidemment développés sur le matériau volcano-sédimentaire et contiennent un fort taux d'éléments grossiers.

### **2.2.5. Occupation du sol**

La région est essentiellement agricole et l'on y cultive, principalement, le cacaoyer et le caféier. Un parc animalier y existe, le parc d'Abokouamékro, à l'intérieur duquel se trouve la colline Blafo. En dehors des cultures, le secteur est le témoin d'une végétation arbustive et de reliques de forêt décidue (figure 13).

### **2.2.6. Activités minières**

La région du Blafo-Guéto, est une région où les indices en manganèse et en or sont avérés. D'après Grandin et Perseil (1983), les indices manganésifères des collines Blafo et Guéto, sur roches quartzitiques et schistes sériciteux, sont associés aux épanchements rhyolitiques de la série volcano-sédimentaire birimienne, avec une minéralisation épigénétique à imprégnation d'oxydes de fer (goethite) et de manganèse (essentiellement MnO<sub>2</sub>-cryptomélane et Nsutite). Ces indices, ont même fait l'objet d'une exploration minière par la société Taurian Steel.

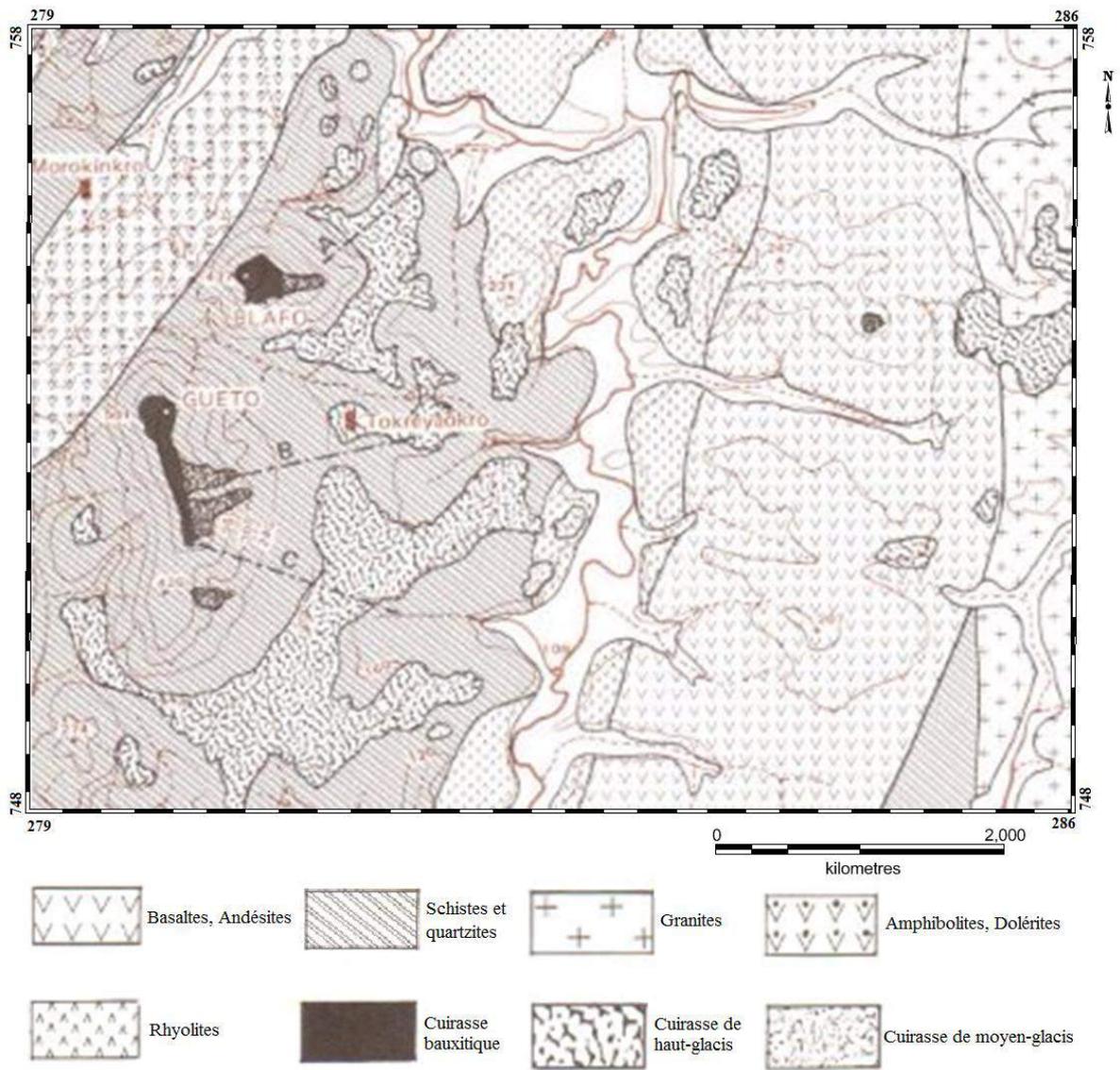


Figure 12 : Géologie locale au niveau du Blafo-Guétó (d'après Grandin, 1976)



Figure 13 : Une vue de la végétation et du paysage observés au Blafo-Guétó

Concernant l'or, plusieurs travaux de recherche ont été exécutés, avec, notamment, des campagnes de géochimie sol, de sédiments de ruisseaux, en vue de la détermination probable d'anomalie géochimique. Les travaux de la société minière Gatroci, débutés en 1995 et 1996, ont permis de dégager l'anomalie principale dans la partie centrale du permis de recherche, au niveau des collines Blafo et Guéto, sur 400 m de longueur et 250 m de largeur. Depuis cette période, les travaux exploratoires se sont intensifiés, avec différentes compagnies (Equigold, LGL, Newcrest). L'avancée des travaux a nécessité l'ouverture de plates-formes de forage (figure 14), avec pour conséquence un début de dégradation de l'environnement, suite à une forte érosion et une accumulation de débris de roche en surface (figure 15).

### **Conclusion partielle**

La particularité rencontrée au niveau du site du Blafo et du Guéto nous a amenés à nous intéresser au fond pédogéochimique dudit site, objet de la présente étude. En effet, la région du Blafo-Guéto est une région où les sols sont brunifiés, riches en manganèse et en or. Elle est exposée au risque de voir son environnement détruit, du fait de l'exploration minière, de l'exploitation probable des minerais, et, la maîtrise de son statut « sol actuel » s'avère indispensable.



Figure 14 : Plates-formes de forage au Blafo-Guétó

A : Réseau de plates-formes

B : Forage carotté sur une plate-forme



Figure 15 : Forte érosion du sol avec dépôt de débris de roche

## **DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL D'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE**

---

**Chapitre III : Matériel utilisé**

**Chapitre IV : Approche méthodologique**

## CHAPITRE III : MATÉRIEL UTILISÉ

### Introduction

Les travaux ont nécessité l'usage de divers matériels pour la cartographie pédologique et l'analyse au laboratoire. Dans ce chapitre, nous faisons le point de tout ce qui a été utilisé comme matériel, non seulement de terrain et de laboratoire, mais aussi des logiciels qui ont permis de traiter les informations recueillies.

### 3.1. Matériel utilisé

#### 3.1.1. Matériel de terrain

Les deux collines, Blafo et Guéto (figure 16) ont constitué le matériel du milieu naturel sur lesquels a porté cette étude. Le milieu du Blafo-Guéto est à matériau volcano-sédimentaire, avec une prédominance de roches quartzitiques et schisteuses.

Sur le terrain, et de façon technique, il a fallu utiliser divers outils de positionnement, d'ouverture de lignes, d'ouverture de fosses pédologiques, de description des échantillons de sol, de cartographie et de prélèvement des échantillons de roche. Ce matériel est composé d'un GPS, d'une boussole, d'un marteau, d'une machette, d'un topofil, de jalons, de pioches, de pelles, d'un code *Munsel*, d'un appareil photo numérique, etc.

Avec le GPS de type Garmin GPSmap 62, nous avons pu prendre la position géographique des différents profils ouverts, ainsi que celle des échantillons de roche que nous avons prélevés. La boussole de type Sylva, a permis d'indiquer les directions (azimuts) voulues suivant lesquelles, avec la machette, les layons ont été ouverts. Le marteau du géologue a été utile pour le prélèvement des échantillons de roche, pendant que les pioches et les pelles ont permis l'ouverture des fosses pédologiques. La couleur des différents horizons de sol décrits a été référée au livret de *Munsel* (code *Munsel*). Il a fallu aussi utiliser une balance de ménagère, de marque *Mondial*, pour peser les échantillons de sol, qui ont, par la suite été tamisés sur un tamis à mailles carrées, de diamètre 2 mm, pour séparer les éléments fins des éléments grossiers. Des sachets plastiques ont été utilisés, pour le conditionnement des échantillons prélevés, et un appareil photo numérique, de type Samsung, a permis les prises de vue.

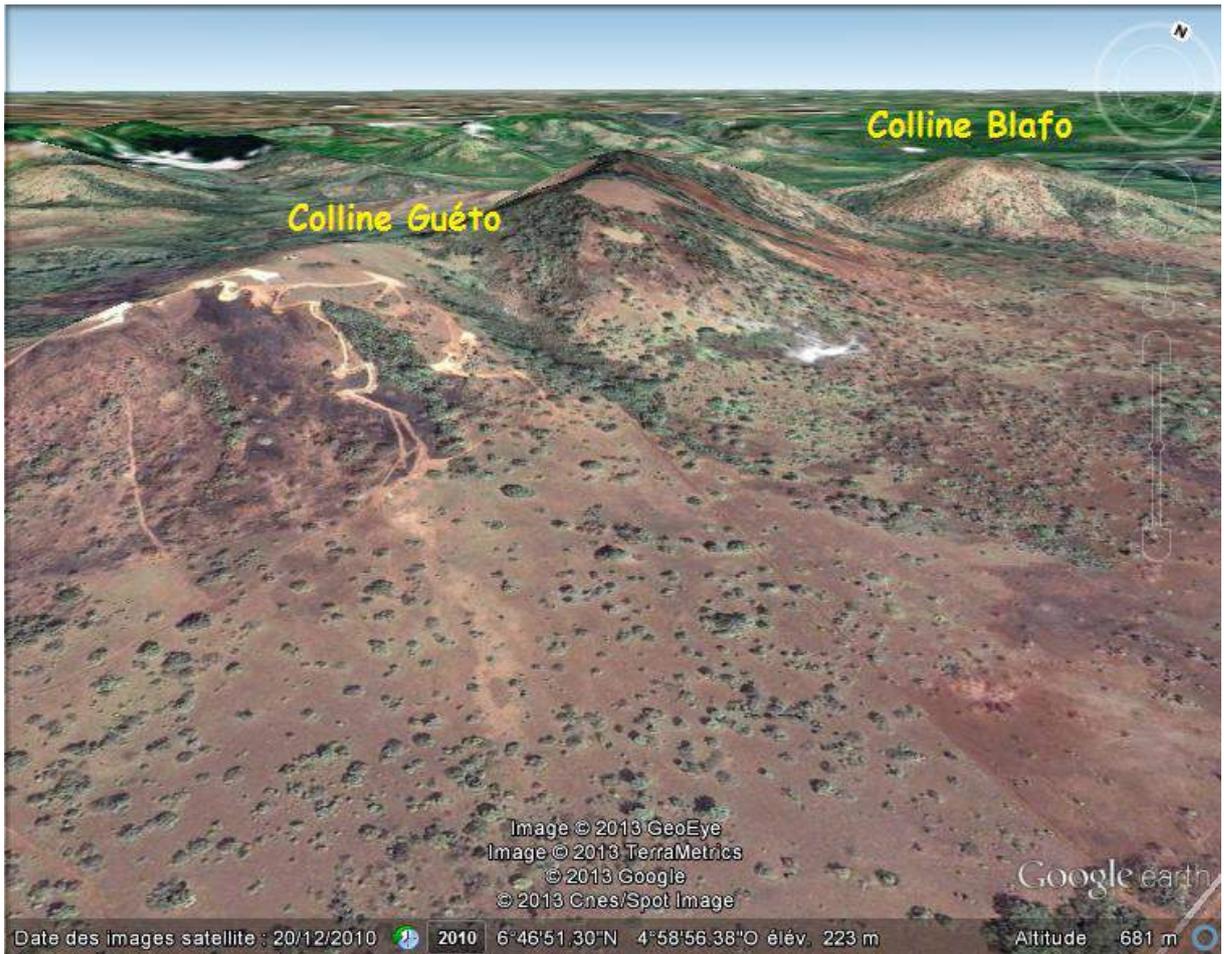


Figure 16 : Vue des collines Blafo et Guéto

### **3.1.2. Matériel de laboratoire**

Au laboratoire, divers matériels ont été utilisés en fonction du type d'analyse souhaité. Dans le cadre de ces travaux, on a procédé à trois (3) types d'analyse que sont la confection de lames minces, l'analyse chimique ponctuelle et totale.

- **Confection et étude de lames minces**

Les lames minces ont été confectionnées au Centre d'Analyse et de Recherche (CAR) de la PETROCI et, il a fallu utiliser une machine à scier les échantillons de roches. Ensuite, un microscope optique, couplé à un écran (microscope pétrographique), a été nécessaire pour l'étude des lames minces, réalisée au Laboratoire de Géologie du Socle et de Métallogénie de l'université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY d'Abidjan-Cocody.

- **Analyse chimique ponctuelle sur échantillons de sol et roche**

Cette analyse a été faite au Centre d'Analyse et de Recherche (CAR) de la PETROCI, à l'aide d'un microscope électronique à balayage, de type FEG Supra 40 VP de Zeiss (figure 17). Ce microscope est couplé d'un microanalyseur de Rayons-X EDS (Spectrométrie à Diffusion d'Énergie), qui permet de fournir, rapidement, des informations sur la composition chimique de l'échantillon. C'est un microscope équipé de cinq (5) détecteurs, qui a servi à réaliser la microanalyse aux R-X de la composition chimique élémentaire des minéraux.

- **Analyse chimique totale sur échantillons de sol et roche**

Pour l'analyse chimique totale, le matériel utilisé est en nombre élevé et les analyses ont été faites au laboratoire d'analyse minérale du Centre Ivoirien Antipollution (CIAPOL). Ce matériel est composé : d'une broyeuse électrique, pour le broyage des échantillons, d'un mortier en porcelaine, pour l'écrasement et la réduction en poudre des échantillons de petite quantité, d'un agitateur mécanique, pour l'homogénéisation des échantillons, d'une balance électronique de précision pour la pesée des échantillons, d'un multimètre, pour la mesure de l'acidité ou de la basicité de l'échantillon, d'un spectromètre d'absorption atomique, pour le dosage des éléments totaux. De plus, divers réactifs ont été utilisés pour les différentes opérations d'attaques chimiques, à savoir : eau distillée, acide chlorhydrique (HCl), acide fluorhydrique (HF), acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) de normalité ½.



Figure 17 : Appareillage MEB/EDS utilisé

### **3.2. Logiciels de traitement informatique**

Plusieurs logiciels ont été utilisés pour traiter toutes les données recueillies. Ainsi, nous avons eu recours au logiciel :

- MapInfo professionnel 11, pour la confection des cartes ;
- Paint, pour le traitement des cartes ;
- Word 2010, pour le traitement de texte ;
- Excel 2010, pour la confection des graphiques et histogrammes ;
- Statistica 7.1, pour le traitement statistique des données.

### **Conclusion partielle**

Ce chapitre a fait le point du matériel naturel utilisé pour les travaux, constitué d'échantillons de sols (40) et de roches (4), qui ont été analysés, à l'aide de divers instruments et réactifs requis. Aussi, les traitements nécessaires sont-ils faits, en utilisant les logiciels indiqués.

## **CHAPITRE IV : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE**

### **Introduction**

La méthodologie suivie pour atteindre les objectifs assignés à ce travail de recherche est exposée dans ce chapitre. Elle prend en compte les travaux réalisés sur le terrain pour recueillir toutes les données nécessaires, les travaux de laboratoire et de traitement statistique.

### **4.1. Travaux effectués sur le terrain**

#### **4.1.1. Approche géologique**

Bien que la géologie de la région du Blafo-Guéto ait été décrite par Grandin (1976), il a été question, dans le cadre des présents travaux, d'investiguer le secteur, pour faire un levé des formations géologiques affleurantes dans le périmètre des lieux de prélèvement des échantillons sols, à l'effet de les observer et apprécier, après analyses physique et chimique, la part du transfert des éléments chimiques, depuis la roche jusqu'au sol. L'opération a consisté à parcourir le prospect sur les lignes ouvertes et à investiguer les différents niveaux des collines Blafo et Guéto, notamment, les sommets et les versants. Ce parcours a permis de rencontrer, sur les versants, deux types de roche métasédimentaires, dont quatre (4) ont été prélevés. L'on a une répartition de deux roches au Blafo et deux roches au Guéto, constituées, pour chaque site, de chacun de ces deux types (métasédiments). Ces échantillons ont servi à confectionner des lames minces pour leur description microscopique et, également, leur analyse chimique au laboratoire, sur poudre, en vue du dosage des différents ETM étudiés.

#### **4.1.2. Caractérisation morphopédologique**

L'étude morphopédologique correspond à l'étude détaillée des sols de chaque secteur de référence, avec une mise au point d'une typologie simplifiée des sols. Elle a permis de comprendre l'organisation et la répartition spatiale des sols pour les paysages caractérisés. Elle s'est déroulée en plusieurs phases :

#### **4.1.2.1. Choix des points de description et d'échantillonnage**

Le choix et la sélection des lieux de description et de prélèvement, sur chaque colline, ont été opérés en tenant compte des unités morphopédologiques ou segments topographiques. Ces segments topographiques sont les différentes tranches d'altitudes, depuis le sommet jusqu'au bas de versant, en passant par le haut versant et le mi-versant. C'est une méthode qui a été décrite par Ruhe et Walker (1968), et qui a l'avantage de renseigner chaque unité.

#### **4.1.2.2. Ouverture et description des fosses pédologiques**

Les fosses pédologiques ont été ouvertes, sur chacune des collines, selon les positions topographiques que sont : le sommet, le haut de versant, le mi-versant et le bas de versant. L'ensemble de la succession des fosses, selon la topographie, a constitué la toposéquence. Ainsi, une toposéquence a été ouverte sur le Blafo, suivant la direction de 108°N, avec 4 fosses pédologiques, notées du sommet vers le bas versant, respectivement, B1, B2, B3 et B4 et, une autre, sur le Guéto, suivant la direction de 185°N, comprenant 5 fosses, numérotées G1, G2, G3, G4 et G5 (figure 18). Ces fosses pédologiques ont été réalisées sous végétation naturelle, et sont larges de 0,80 m, longues de 1 m, avec des profondeurs variant de 0,7 m à 1,2 m au Blafo, et de 1,2 m à 2 m au Guéto.

Les informations sur le contenu de chaque fosse pédologique ont été acquises par observation et, en renseignant des fiches de description normalisées pour la cartographie, suivant l'approche ORSTOM dont s'est inspirée Boulet *et al.* (1982). Les principaux caractères morphologiques concernent :

- la profondeur ou épaisseur de l'horizon, mesurée à l'aide d'un mètre ruban ;
- la couleur de chaque horizon du sol, déterminée à l'état humide, à l'aide du code Munsell. Elle a permis d'indiquer la présence ou non de matière organique dans les horizons ;
- la texture du sol ou caractérisation de la dimension des particules minérales. Elle a été déterminée de façon tactile, en indiquant, le cas échéant, la teneur estimée d'argile. Ainsi, lorsque le toucher de l'échantillon humecté est rugueux, on est dans la catégorie des sables. Si le toucher est doux et soyeux, ce sont les limons (diamètre entre 2 et 50  $\mu\text{m}$ ) et, quand le toucher est doux, mais que le sol colle sur les doigts, on parle d'argile (diamètre  $< 2\mu\text{m}$ ) ;

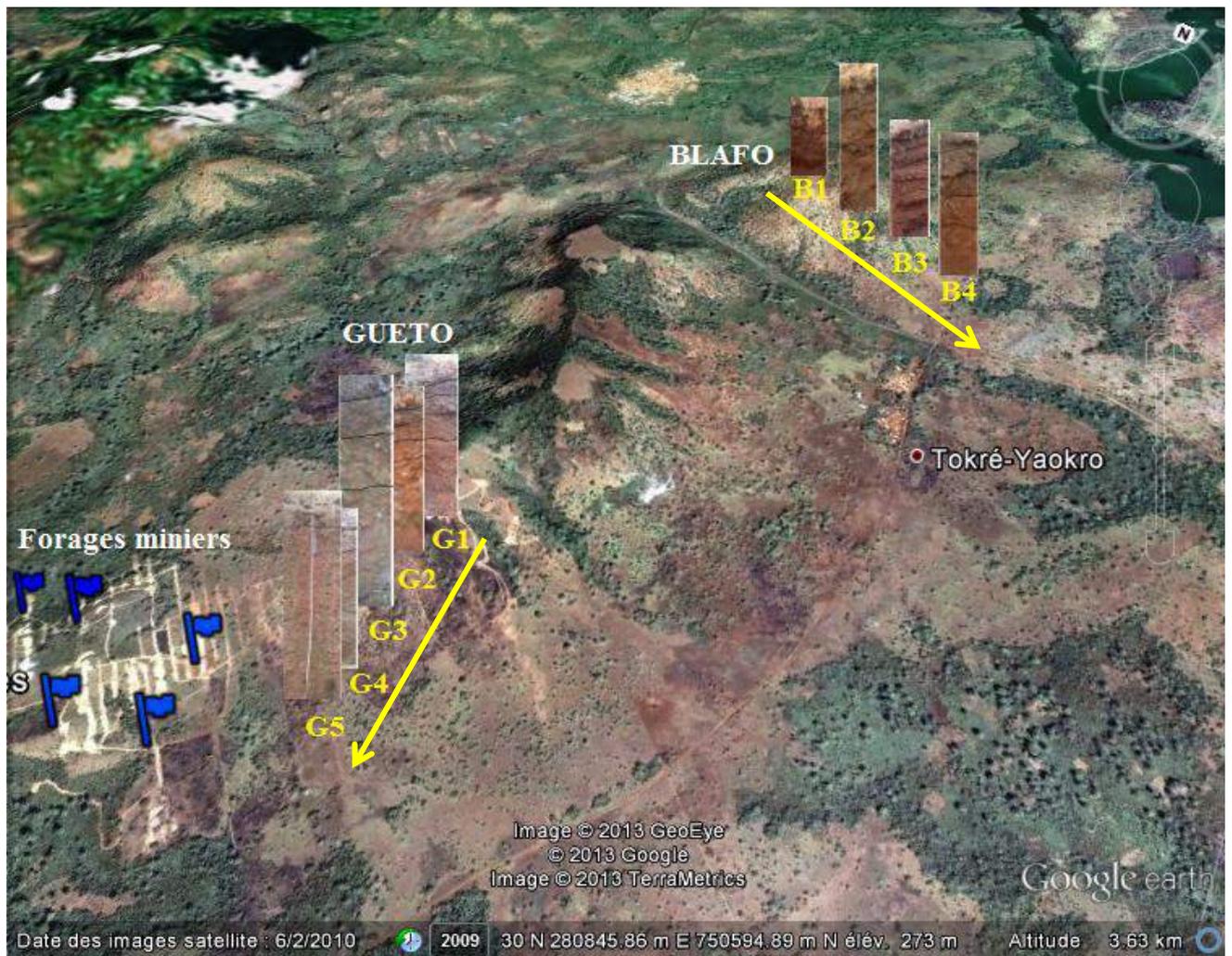


Figure 18 : Toposéquences implantées au Blafo et au Guéto

- ❑ la teneur et la nature des éléments grossiers (concrétions et nodules, quartz), déterminées à la pesée, pour la teneur, et à la loupe, pour le type. Pour cette appréciation, des échantillons du sol, représentatifs de chaque horizon identifié, ont été prélevés, séchés à l'air libre, sous abri pendant deux semaines, puis pesés. Ensuite, les échantillons ont été tamisés à l'aide d'un tamis à mailles carrées de 2 mm et, le refus, constituant les éléments grossiers, est pesé. Le rapport du poids du refus sur le poids avant tamisage, donne, le pourcentage des éléments grossiers ;
- ❑ la structure générale et la structure du débit, déterminées par examen à l'œil nu, en précisant la taille (millimétrique, centimétrique ou décimétrique). La structure qui renseigne sur l'architecture du sol, c'est-à-dire, sur le mode d'agencement de ses composants, a été appréciée selon la présence ou non d'agrégats ;
- ❑ la porosité générale et la taille des pores, déterminées à la loupe, ou lorsqu'une fine quantité d'eau versée sur une motte de terre, arrive ou non à la traverser. On parlera de sols poreux, lorsque l'eau y pénètre, traverse l'échantillon, et de sol non poreux, lorsqu'elle ne traverse pas l'échantillon ;
- ❑ la classe de drainage, déterminée par l'observation de tâches d'hydromorphie, a permis d'apprécier le drainage interne du sol, sur la base de la couleur des tâches présentes dans les horizons. Ces tâches, qui sont la marque des signes d'excès d'eau (hydromorphie) ou non, peuvent être des tâches d'oxydation, rouille, de décoloration, d'oxydo-réduction ;
- ❑ la limite entre les couches d'horizon, déterminée par l'observation de la régularité de la ligne de base : elle peut être nette, régulière ou irrégulière.

Le type de sol, au niveau de chaque fosse, a été déterminé sur la base des descriptions morphologiques, par rapport à la classification de la Commission de Pédologie et de Cartographie des sols (CPCS, 1967), adapté et classé dans le système de la base mondiale de référence "World Reference Base" (WRB), défini par la FAO, en 2006.

#### **4.1.2.3. Échantillonnage**

Les échantillons prélevés sont représentatifs des horizons décrits. Au total, 40 échantillons ont été prélevés, dont 20 échantillons au Blafo et 20 échantillons au Guéto. Cet échantillonnage a permis l'étude pétrologique et chimique des sols au laboratoire.

## **4.2. Travaux effectués au laboratoire**

### **4.2.1 Confection et observation de lames minces**

Quatre (4) lames minces ont été confectionnées au Centre d'Analyse et de Recherche (CAR) de la PETROCI, à partir des échantillons de roches prélevés au Blafo et au Guéto. Ces lames minces, ont ensuite été observées au microscope optique et au microscope électronique à balayage, pour une meilleure caractérisation. L'identification des phases minérales, l'analyse de leur agencement et de leurs relations, éventuellement leur pourcentage, y ont ainsi été effectuées.

### **4.2.2. Analyse au microscope électronique à balayage (MEB)**

L'analyse ponctuelle ou analyse microscopique ponctuelle de chaque phase a été réalisée par Spectrométrie à Diffusion d'Énergie (EDS), couplée au microscope électronique à balayage (MEB). La microscopie électronique à balayage automatisée, couplée à la microanalyse (R-X/EDS), permet une analyse de la composition chimique, en déterminant tous les éléments chimiques, métaux et métalloïdes, que contiennent ces échantillons de roche et de sol. Elle est donc élémentaire et qualitative. La limite de détection est de l'ordre de 500 à 10000 ppm (0,05 à 1%).

#### **4.2.2.1. Mode opératoire**

##### **- Cas des lames minces**

Les lames minces ont été carbonisées avant de passer au MEB. Le processus de carbonisation consiste à mettre une fine couche de carbone sur chaque lame mince et, ceci a été possible à l'aide de l'évaporateur carbone de type Quorum Q150T€. Cette opération de carbonisation des lames minces est nécessaire pour les rendre conducteur, afin d'éviter qu'elle charge et, limiter les interférences lors de l'analyse X.

##### **- Cas des échantillons poudre de sol et de roche**

Les échantillons de sols soumis à l'analyse ont, dans un premier temps été séchés à l'ombre, à l'air libre pendant 14 jours, puis tamisés à l'aide d'un tamis à maille de 2 mm. Ensuite, la partie fine recueillie a été broyée, tamisée à 63 µm. Quant aux échantillons de roches, ils ont été concassés, broyés et pulvérisés au laboratoire d'analyse minérale de la SODEMI. Une fois

la poudre obtenue, chacun des échantillons (40 pour le sol et 4 pour la roche) a suivi le traitement suivant :

- prélèvement d'environ 10 mg de chaque échantillon ;
- étalement de l'échantillon prélevé sur un plot (support) apprêté avec du carbone adhésif à double faces. La répartition sur le plot a été le plus homogène possible ;
- fixation du plot sur le plateau (plateau à 9 plots) ;
- montage du plateau d'échantillon prêt, sur la platine de la chambre du MEB pour la microanalyse.

#### **4.2.2.2. Mise en route du MEB et microanalyse**

La mise en route de l'appareil et la microanalyse requièrent la procédure suivante :

- mise sous tension ; mise en route des moniteurs (ouvrir le logiciel SmartSEM) ;
- vérification du vide primaire (chambre)  $10^{-6}$  et du vide secondaire (colonne)  $10^{-10}$  ;
- suppression du vide de la chambre ;
- introduction de l'échantillon ;
- réfection du vide primaire ( $10^{-6}$ ) ;
- choix de la distance de travail (8,5 mm) ; Choix du diamètre de l'ouverture (30  $\mu\text{m}$ ) ;
- choix de l'énergie primaire (20KeV) ; Choix du détecteur (Rayons-X) ;
- obtention de l'image ; ajustement du focus ;
- réglage du contraste et de la luminosité ;
- microanalyse X par EDS.

Pour le principe de fonctionnement de la microanalyse, les particules déposées sur le plot sont individuellement frappées, sous vide, par un faisceau d'électrons. Les interactions électrons-particules engendrent un spectre d'émission de rayons X, dont une partie est caractéristique de la composition chimique élémentaire de la particule. La méthode consiste à analyser le rayonnement X émis par l'échantillon soumis au bombardement d'un faisceau d'électrons de quelques keV à quelques dizaines de keV. Le rayonnement émis par l'échantillon est

constitué de raies caractéristiques des éléments qui le composent. L'identification des raies permet de remonter à la composition élémentaire de l'échantillon. Mais, pour que l'étude soit statistiquement fiable, il faut analyser un grand nombre de particules (de l'ordre du millier) en mode automatique ; ce qui permet ainsi, d'identifier les différentes associations élémentaires rencontrées. Cette microanalyse a été répétée trois fois, par échantillon.

### **4.2.3. Analyse chimique totale en solution**

#### **4.2.3.1. Dosage des éléments traces métalliques (ETM)**

Cette analyse a été faite à la suite de l'analyse au microscope électronique à balayage. En réalité, la détection qualitative au MEB des éléments chimiques constituant les échantillons de sols et de roches, a guidé le choix des différents éléments traces métalliques (ETM) à quantifier au Spectromètre d'Absorption Atomique à Flamme (SAAF). Seuls, les éléments chimiques identifiés au MEB ont été dosés à trois reprises au SAAF. Ces éléments sont : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le Mercure (Hg), le manganèse (Mn), la molybdénite (Mo), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le strontium (Sr), le titane (Ti) et le zinc (Zn).

La spectrométrie d'absorption atomique est une technique pouvant servir à mesurer la concentration de plus de 60 métaux différents, en solution. Elle fait partie des méthodes classiques d'analyse en chimie analytique, et est basée sur des méthodes optiques. L'analyse se base sur l'absorption de photons par des atomes à l'état fondamental, et à cet effet, on utilise généralement des solutions. Ainsi, une préparation en solution est nécessaire et, dans notre cas, environ 0,3 g de chaque échantillon a été digérée. Elle est très sélective et il n'y a pas d'interférences spectrales. La SAAF est basée sur le principe qu'une population d'atomes à l'état fondamental (état  $E_0$ ) peut absorber des photons d'énergie ( $h\nu$ ), et qu'une estimation du nombre de photons absorbés peut être reliée à la concentration de l'élément dans la solution à analyser. En SAAF, le phénomène d'absorption s'observe lorsque la radiation caractéristique d'un élément traverse un nuage de vapeur atomique du même élément. Le spectromètre se compose d'une source lumineuse qui émet un rayonnement, à une longueur d'onde spécifique de l'élément à analyser. La solution à analyser est aspirée par effet venturi, via un nébuliseur, qui projette en fines gouttelettes la solution dans le brûleur, dont la flamme, très chaude, sert d'atomiseur. Les atomes excités par la source absorbent son énergie. La

disparition du signal est répercutée, via des systèmes optiques, puis détectée et amplifiée. On mesure une absorbance (Mun, 2007). Mais, les concentrations doivent être à l'échelle de traces pour rester dans le domaine de linéarité de la loi de Beer-Lambert.

#### **4.2.3.2. Détermination du pH et du potentiel d'oxydo-réduction des sols**

Le potentiel Hydrogène (pH) et le potentiel d'oxydo-réduction (Eh) de chaque échantillon sol ont également été déterminés. La mesure de ces deux paramètres est très importante dans la mesure où, elle permet, dans le cas du pH, de connaître le niveau d'acidité ou de basicité des sols au Blafo-Guéto, et, au niveau du Eh, le caractère oxydant ou réducteur des horizons décrits. Le pH dépend de la concentration en ions  $[H_3O^+]$  de la solution du sol, et se mesure sur une échelle allant de 0 à 14 (Dinon et Gerstmans, 2008). Ainsi, les solutions acides ont un pH inférieur à 7, les solutions basiques ont un pH supérieur à 7, et les solutions neutres ont un pH égal à 7. Une classification beaucoup plus rigoureuse du pH et de son statut acido-basique peut être vue comme suit :

- $pH \leq 5,5$  : sol très acide
- $5,5 < pH \leq 6,0$  : sol acide
- $6,0 < pH \leq 6,5$  : sol moyennement acide
- $6,5 < pH \leq 7,0$  : sol neutre
- $7,0 < pH \leq 7,5$  : sol peu alcalin (peu basique)
- $pH > 7,5$  : sol alcalin (basique)

Quant au Eh, il indique l'état d'oxydo-réduction des sols. Le potentiel d'oxydoréduction est exprimé en fonction des concentrations des ions en solution. Sa mesure est intéressante à considérer pour l'établissement de relations avec les régimes hydriques et les régimes d'aération auxquels est lié le développement de conditions réductrices ou oxydantes, vis-à-vis de différents éléments du sol. Il exprime ainsi la qualité des conditions d'oxydoréduction du sol, tel que défini par Bohn (1968).

La méthode potentiométrique ou méthode analytique est celle utilisée pour la mesure de ces paramètres pour sa commodité, sa rapidité et sa précision. Le multimètre de type WTW 350I a servi à cet effet et, les différentes valeurs du pH et du Eh sont lues directement sur l'écran de l'appareil, après avoir plongé la sonde (électrode indicatrice) dans la solution préparée. En effet, le principe de fonctionnement tient compte de la mise en solution de chaque échantillon de sol et de la mesure des paramètres par l'appareil. Pour que l'appareil utilisé pour mesurer

le pH fonctionne comme un pH-mètre, c'est-à-dire, pour qu'il indique directement la valeur du pH, il a été préalablement étalonné, et le calibrage a été fait avec deux solutions tampons à pH = 4 et pH = 7.

Pour la mise en solution et la lecture des valeurs du pH et du Eh de chaque échantillon, les opérations suivantes a été réalisées :

- introduction de 20 g de l'échantillon sec dans un bécher en plastique de 100 mL ;
- ajout de 50 mL d'eau distillée et agitation pendant 2 min, sur un agitateur magnétique ;
- décantation pendant 30 min, et mesure du pH et Eh du surnageant, en y introduisant la sonde.

#### **4.3. Traitement des données**

Les traitements des données ont été divers et ont tenu compte des différentes étapes de l'étude :

- d'abord, au niveau de l'étude géologique, dont les lames minces et la microanalyse ont permis une meilleure caractérisation des éléments chimiques contenus dans les roches ;
- ensuite, au niveau de la caractérisation morphopédologique, *in situ*, des sols étudiés, où les données de la description des fosses pédologiques, ont permis de comprendre le fonctionnement de ces sols ;
- enfin, au niveau des résultats d'analyses chimiques et géochimiques des échantillons de sols et de roches. Ces résultats, ont été traités et présentés pour chaque profil, en distinguant les horizons, les tranches d'horizons (horizon de surface humifère et horizon de profondeur non humifère), la position topographique et la couverture latérale. Quelquefois, des ratios d'équilibre entre éléments chimiques étudiés, ont été pris en compte.

Toutes ces données, notamment, analytiques, ont finalement été traitées à l'aide de tests statistiques, grâce au logiciel Statistica 7.1.

### **4.3.1. Analyse statistique des données chimiques et géochimiques des échantillons de sols et de roches**

Les analyses statistiques ont été faites à partir de tests paramétriques, et, seules les données respectant les tests de normalité ont fait l'objet d'une analyse de variance paramétrique.

#### **4.3.1.1. Analyse de la variance**

La forme générale de l'analyse de la variance (ANOVA) repose sur le test de Fisher, et donc sur la normalité des distributions, ainsi que l'indépendance des échantillons. C'est la méthode la plus utilisée pour tester les différences significatives entre les variables. Ainsi, les différences de concentration en éléments traces métalliques, en pH et Eh des échantillons ont été examinées, à travers l'ANOVA, suivies, lorsqu'elles étaient significatives, par le test de comparaison LSD de Fischer. Les moyennes des variables ont été séparées au seuil  $\alpha = 0,05$ .

#### **4.3.1.2. Étude de la matrice de corrélation sur les données sols**

Pour mesurer le degré de liaison entre les variables, des études de corrélation ont été réalisées. Pour cela, le coefficient de corrélation de Pearson entre les variables a été déterminé aux probabilités  $p < 0,05$  ;  $p < 0,01$  et  $p < 0,001$ . Ce coefficient ne mesure adéquatement que la liaison linéaire entre deux variables, ou la force d'une liaison entre deux, ou plusieurs séries de données. Ainsi, pour les variables, on cherchera celles qui sont très corrélées entre elles, celles qui, au contraire, ne sont pas corrélées aux autres.

#### **4.3.1.3. Analyse en composantes principales des ETM des sols**

Dans le souci de chercher les groupes d'éléments chimiques (ETM) qui se ressemblent ou se distinguent, les uns des autres, une Analyse en Composantes principales (ACP) a été effectuée. C'est une méthode descriptive multidimensionnelle ou méthode factorielle, qui dépend d'un modèle géométrique. L'ACP est une méthode très efficace pour l'analyse de données quantitatives, qui permet de visualiser ou analyser rapidement les corrélations entre les N variables. L'ACP définit les facteurs principaux permettant d'expliquer les phénomènes de corrélation, à la condition, et comme le soulignent Thomassone *et al.* (1993), que la somme cumulée des contributions des principaux facteurs retenus soit d'environ 70 %.

#### 4.3.2. Détermination de l'état d'altération des roches et de leur origine sédimentaire

Les données analytiques géochimiques, traitées statistiquement, ont, par la suite, permis d'indiquer l'état d'altération des roches prélevées et le type de sédiment.

La détermination de l'état d'altération s'est faite en appliquant le diagramme de Hugues (1973), aux différentes roches. Ce diagramme se base sur le comportement des alcalins, pour un rapport  $K_2O \times 100 / (Na_2O + K_2O)$  en abscisse et  $Na_2O + K_2O$  en ordonnée. Différents champs sont sur ce graphe (champ de roches altérés et champ de roches saines), déterminant ainsi l'état de la roche étudiée.

Pour la classification des sédiments, le diagramme de discrimination de Herron (1988), basé sur le diagramme  $\log (SiO_2/Al_2O_3) - \log (Fe_2O_3/K_2O)$  a été utilisé.

#### 4.3.3. Détermination de l'indice d'altération des échantillons sols

Les indices d'altération utilisés pour caractériser l'évolution chimique de sols étudiés comprennent :

- ❑ l'indice d'altération chimique ou "Chemical Index of Alteration" (CIA). Le CIA est interprété comme une mesure de la conversion des feldspaths (silico-aluminate potassique, sodique ou calcique) aux argiles. Cette méthode a été élaborée par Nesbitt et Young (1982), et est basée sur la formule :

$$CIA = 100 \times (Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)) \quad \{1\}$$

Ainsi, un matériel frais, non altéré, présentera un CIA faible (environ 50 ou moins) et, plus l'altération est poussée, plus les cations sont perdus par le matériel, plus le CIA augmente. Il est alors égal à 100, au maximum ;

- ❑ l'indice silice-titane ou 'Silica-Titania Index' (STI). Cet indice a été développé par De Jayawardena et Izawa (1994) pour évaluer le degré d'altération chimique des roches silicatées dans les régions tropicales. La formule de calcul est de :

$$100 \times [(SiO_2/TiO_2) / ((SiO_2/TiO_2) + (SiO_2/Al_2O_3) + (Al_2O_3/TiO_2))] \quad \{2\}$$

De cette formule, le matériel est frais pour un STI > 90 et, quand le matériel est beaucoup altéré, le STI tend vers 0.

#### 4.3.4. Étude de quelques ratios d'oxydes

Dans l'optique de la compréhension de la minéralogie relative des sols étudiés, quelques ratios d'oxydes ont été calculés. Ainsi, les différents rapports moléculaires suivants, pour chaque échantillon ont été appréciés :

- $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  : ce rapport permet de dégager le type d'argile constituant le sol analysé. Ainsi, pour un rapport :
  - $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 2$ , on est en présence d'un mélange de kaolinite et de gibbsite ;
  - $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 2$ , c'est la kaolinite seule qui est présente ;
  - $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 2$ , le sol contient une argile de type 2/1.
  
- $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  : souligne le caractère entre alcalins, permettant de dégager le caractère dominant de l'un ou l'autre des éléments  $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$  (*in* Sørensen, 1974). Ainsi, si le rapport :
  - $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} < 0,5$ , l'affinité est potassique
  - $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} < 0,3$ , le  $\text{K}_2\text{O}$  domine largement le  $\text{Na}_2\text{O}$
  - $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} \geq 1$ , cela traduit une affinité sodique de l'échantillon.
  
- $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  par rapport à  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ainsi, si  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} > \text{Al}_2\text{O}_3$ , le sol a un caractère hyperalcalin. Dans le cas contraire, le caractère du sol est plus alumineux.
  
- $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$  : souligne le fait d'apport d'engrais au sol en cas de mise en valeur. Ainsi, si  $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO} > 2,5$ , le sol ne nécessite pas d'apport d'engrais. En revanche, si ce rapport est inférieur à 2,5 ; l'apport d'engrais est une nécessité.

#### Conclusion partielle

Les différentes méthodes expliquées dans ce chapitre, ont été choisies par rapport à des applications élaborées par divers auteurs, jugées utiles pour notre étude. Ces méthodes ont donc été adaptées à notre étude, et, les nombreux résultats auxquels ils ont permis d'aboutir, sont présentés dans la troisième partie de ce document.

## **TROISIÈME PARTIE :**

# **RÉSULTATS, INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSION**

---

**Chapitre V : Résultats**

**Chapitre VI : Interprétations et discussion**

## CHAPITRE V : RÉSULTATS

### Introduction

Ce chapitre fait, tour à tour, le point des différents résultats obtenus, à savoir : premièrement, le contenu chimique et les phases minérales des roches prélevées autour des points d'observations pédologiques, deuxièmement, les principaux caractères macromorphologiques des sols étudiés au Blafo et au Guéto, troisièmement les résultats des analyses multi élémentaires, caractérisés par la détermination des cations majeurs par microanalyse X, et des éléments traces métalliques au spectromètre d'absorption atomique.

### 5.1. Caractérisation des matériaux géologiques

#### 5.1.1. Photographies des roches et coordonnées des points de prélèvement

Les roches observées lors de l'investigation géologique du secteur du Blafo-Guéto, dans la portion volcano-sédimentaire, sont essentiellement des métasédiments (figures 19 et 20). Au plan macroscopique, certaines, de couleur grise à gris noir, avec des fractures (figure 19), ont été essentiellement observées sur les flancs des collines Blafo et Guéto. Elles sont en blocs massifs, et leurs cassures sont conchoïdales. D'autres, plus stratifiées (figure 20), présentent différents faciès. Ils présentent des plans de schistosité (figure 20A), des plans de stratification orientés N058°/60°NW (figure 20B), N120°/26°SW (figure 20C) et des failles (figure 20D). La faille présentée à la figure 20D est inverse, orientée N40°/85°SE.

Les coordonnées des quatre (4) échantillons prélevés, dont deux (2) au Blafo et deux (2) au Guéto, sont consignées dans le tableau I. Ces coordonnées sont en UTM, et, indiquent, pour chaque point de prélèvement, la longitude, la latitude et l'altitude.

Tableau I : Coordonnées des échantillons roches prélevés au Blafo et au Guéto

Site	Échantillon	Longitude (m)	Latitude (m)	Altitude (m)
Blafo	R1	281 567	752 859	279
	R2	281 864	753 178	233
Guéto	R3	280 029	750 042	326
	R4	280 034	749 992	326



Figure 19 : Affleurement de roche sur flanc de la colline Guéto (A), de la colline Blafo (B) ;  
C : Vue microscopique d'une roche consolidée



Figure 20 : Différents faciès de métasédiments observés au Guéto (A et B) et au Blafo (C et D)

### **5.1.2. Analyse microscopique des lames minces**

Les microphotographies des lames minces étudiées sont indiquées sur les figures 21, 22, 23 et 24.

#### **5.1.2.1. Cas des lames minces issues des roches du Blafo**

L'aspect microscopique de l'échantillon R1 prélevé au niveau du Blafo est rapporté par les figures 21A et 21B. La figure 21A est la représentation, en lumière polarisée, de la lame, et la figure 21B, l'observation au microscope électronique à balayage. On observe sur la lame, l'orientation des minéraux selon une direction préférentielle. Ces minéraux sont, dans l'ensemble, composés de grains de quartz, fins à très fins. La paragenèse est à quartz, feldspaths, minéraux phylliteux. Une analyse au microscope électronique à balayage (MEB), à travers trois spectres (spectre 1, 2 et 3), tel qu'indiqué sur les figures 21C, 21D et 21E, montre la présence de silicium, de phosphore et de quelques terres rares, comme le cérium (Ce), le lanthane (La), le néodyme (Nd). On note aussi, la présence de fer (Fe), de nickel (Ni), de calcium (Ca) et de potassium (K).

Concernant la roche R2, les cristaux de quartz sont abondants et sont fortement soudés entre eux. La paragenèse minérale se compose, essentiellement, de quartz et de feldspath. Les fractures observées au niveau des affleurements y sont visibles (figure 22A et 22B) à la microphotographie, et, un phénomène de concentration de fer s'y observe sous forme de couleur blanchâtre à l'observation au MEB (figure 22B). Les différents spectres obtenus lors de l'investigation au MEB, rapportés sur les figures 22C, 22D et 22E indiquent, essentiellement, la présence de silicium dans la formation. On y observe aussi, la présence de fer et de quelques éléments chimiques tels le baryum (Ba), le titane (Ti), le chlore (Cl), le strontium (Sr), le calcium (Ca), le potassium (K)

#### **5.1.2.2. Cas des lames minces issues des roches du Guéto**

Au niveau du Guéto, l'observation microscopique de la roche R3 présente des plans de schistosité. Sur la figure 23A, prise en lumière polarisée, on observe cette schistosité, et, un agrandissement au MEB (figure 23B), indique une fracturation. On est ainsi en présence d'une schistosité de fracture. La paragenèse minérale est composée de quartz, de feldspaths, de minéraux phylliteux.

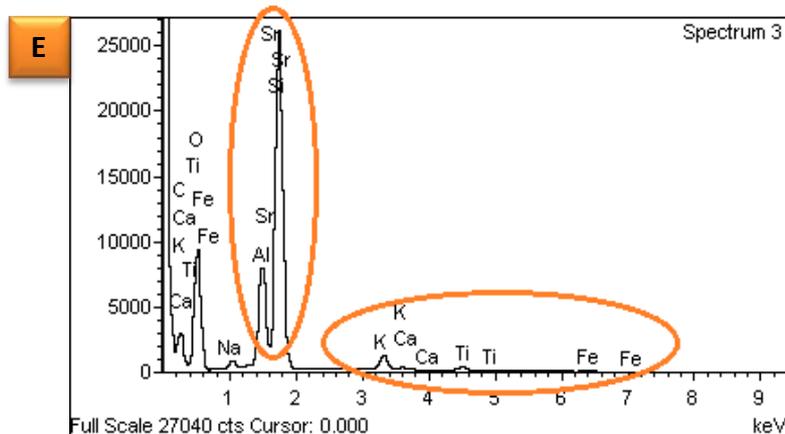
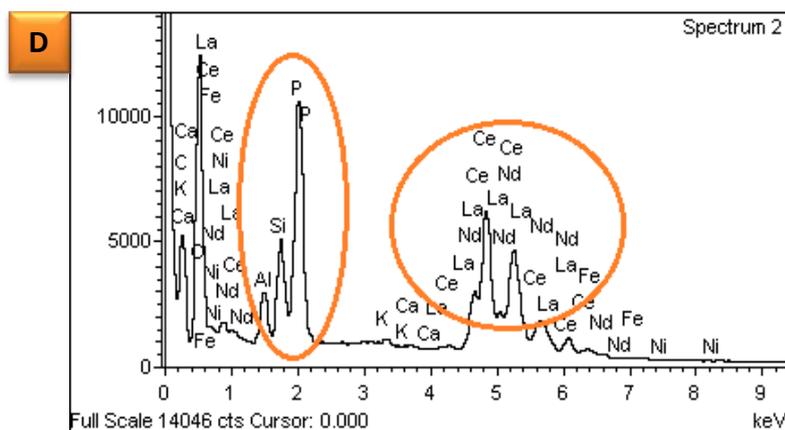
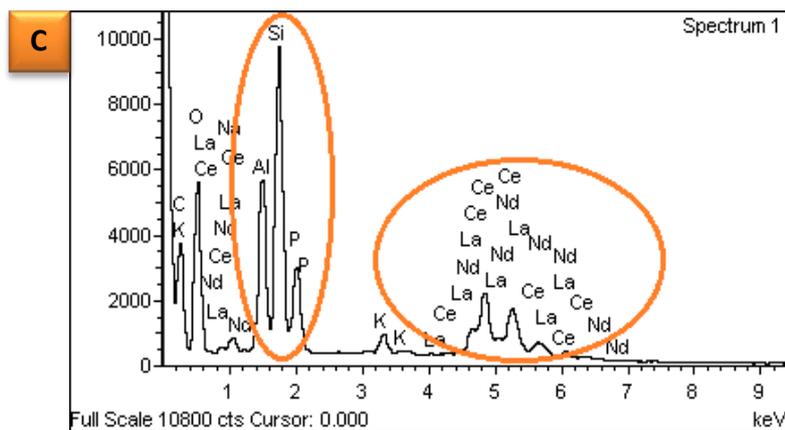
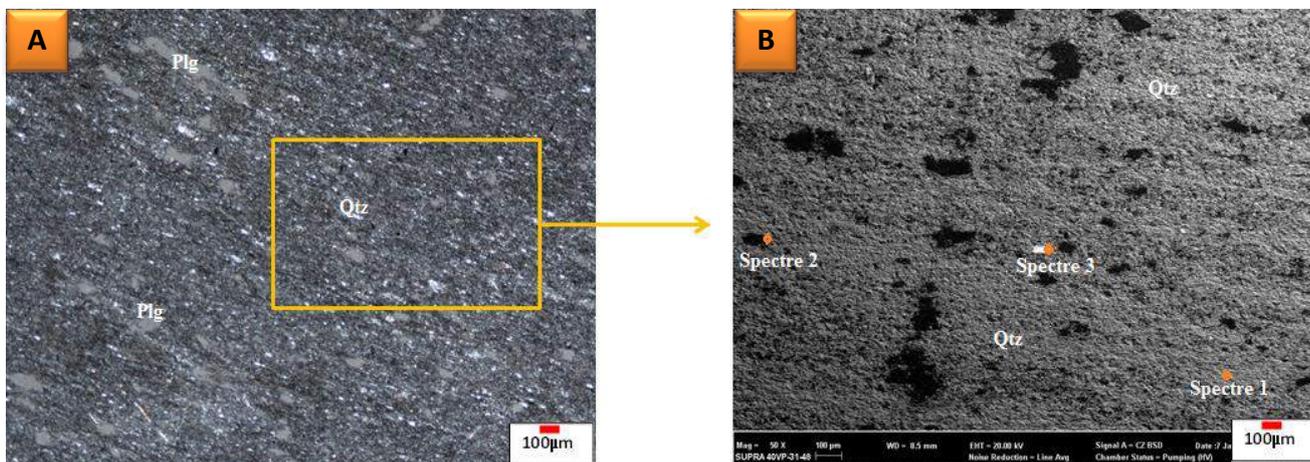


Figure 21 : Microphotographies et spectres de la roche R1 prise au Blafo

A : Vue en lumière polarisée (LP)    B : Agrandissement au MEB avec prise de spectres    C, D, E : Spectres visibles au MEB indiquant la présence d'éléments chimiques    Plg : Plagioclase    Qtz : Quartz

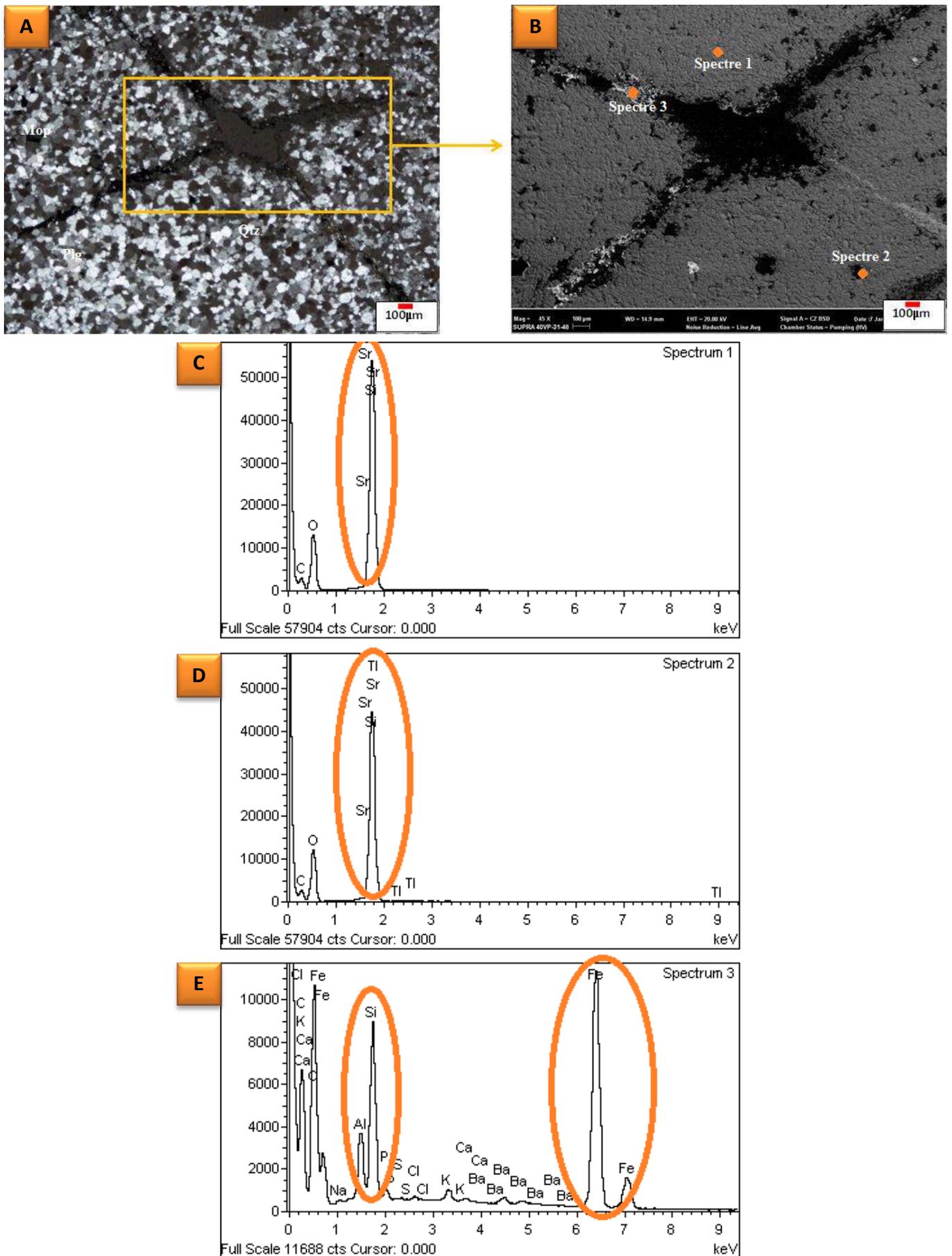


Figure 22 : Microphotographies et spectres de la roche R2 prise au Blafo

A : Vue en lumière polarisée (LP)      B : Agrandissement au MEB avec prise de spectres  
 C, D, E : Spectres visibles au MEB indiquant la présence d'éléments chimiques

La prise des spectres (spectre 1, 2 et 3) observables sur les figures 23C, 23D et 23E indique, essentiellement, la présence de silice, de fer, d'aluminium et, quelques terres rares.

La roche R4 prélevée au Guéto est composée de la même paragenèse minérale que celle du Blafo. La microphotographie prise en lumière polarisée (figure 24A) indique des niveaux de corrosion (altération) où s'accumule du fer. La concentration de fer s'observe sur la figure 24B, prise au MEB. Sur cette microphotographie, le fer a un aspect blanchâtre, tels qu'en témoignent les différents spectres (spectre 1 et 3). En plus de la silice, abondamment présente, des éléments chimiques tels que le dysprosium (Dy), le cobalt (Co), l'arsenic (As), le magnésium (Mg), le phosphore (P), le vanadium (V), le calcium (Ca) et le fer (Fe) y sont reconnus.

### **5.1.3. Microanalyse de Rayon X sur poudre de roche**

La microanalyse R-X effectuée sur les échantillons de roche (R1, R2, R3 et R4) montre la présence de carbone (C), de sodium (Na), d'aluminium (Al), de silicium (Si), de potassium (K), de titane (Ti), de fer (Fe), de cuivre (Cu), de strontium (Sr) et d'oxygène (O). Les proportions des éléments présents dans les différents échantillons (pourcentage de masse) sont présentées dans le tableau II, et la composition chimique relative, de chaque échantillon de roche est donnée dans le tableau III.

L'élément prédominant déterminé est le silicium (Si), dont la proportion est à peu près constante pour les échantillons R2 et R4. En ce qui concerne les échantillons R1 et R3, on note une diminution de la proportion de silicium, comparée à celle des échantillons R2 et R4. L'aluminium est plus abondant dans les roches R1 et R3 que dans les roches R2 et R4. Le fer, le potassium, le sodium, le strontium sont présents dans tous les échantillons, dans des proportions variables. En dehors de ces éléments, toujours présents, on note la présence de cuivre et de titane, dans les roches R1 et R3.

### **5.1.4. Teneur totale des ETM étudiés sur poudre de roche**

Le tableau IV donne les résultats d'analyse des échantillons pulvérisés de roche, analysés au spectromètre d'absorption atomique à flamme (SAAF), pour la détermination des divers ETM recherchés. Ces teneurs, exprimées en ppm, sont, à des proportions où le Fe et le Ti sont les plus grandes.

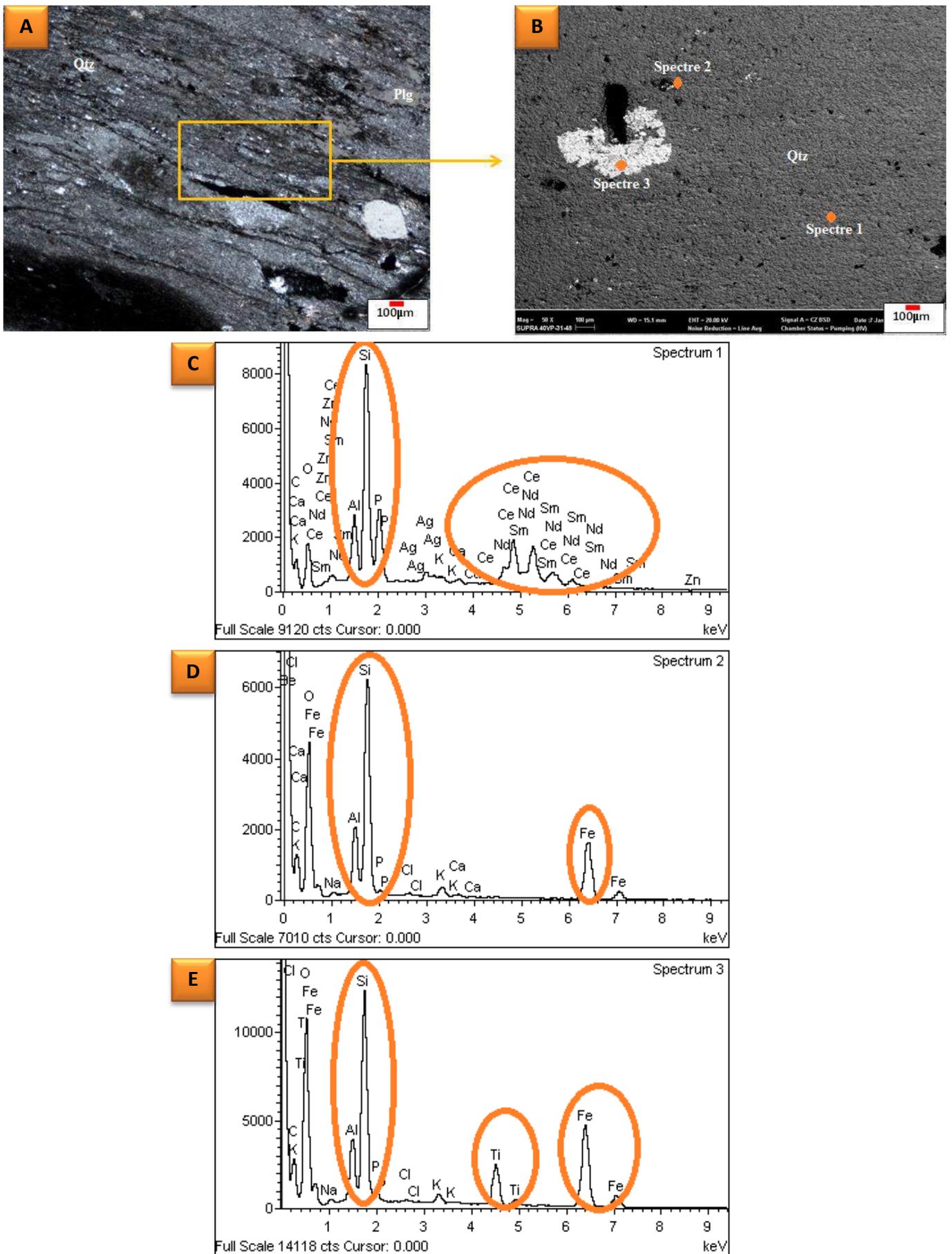


Figure 23 : Microphotographies et spectres de la roche R3 prise au Guéto

A : Vue en lumière polarisée (LP)    B : Agrandissement au MEB avec prise de spectres    C, D, E : Spectres visibles au MEB indiquant la présence d'éléments chimiques    Plg : Plagioclase    Qtz : Quartz

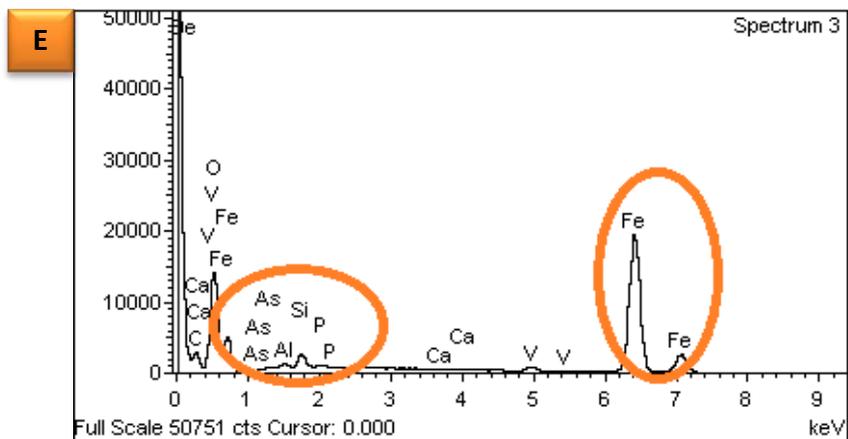
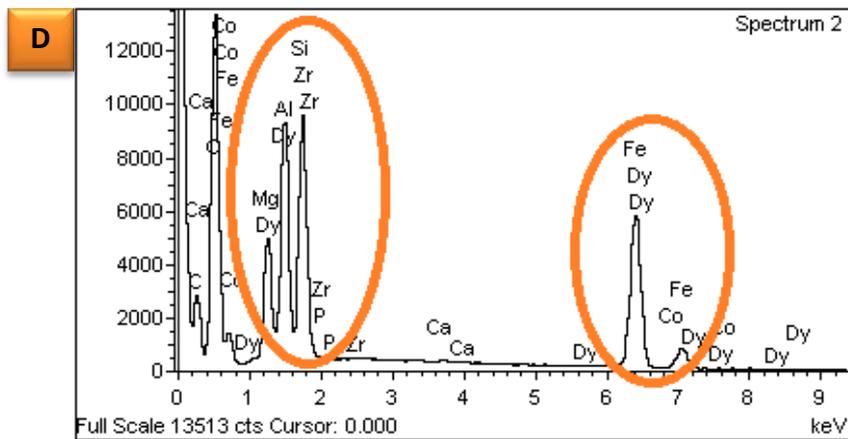
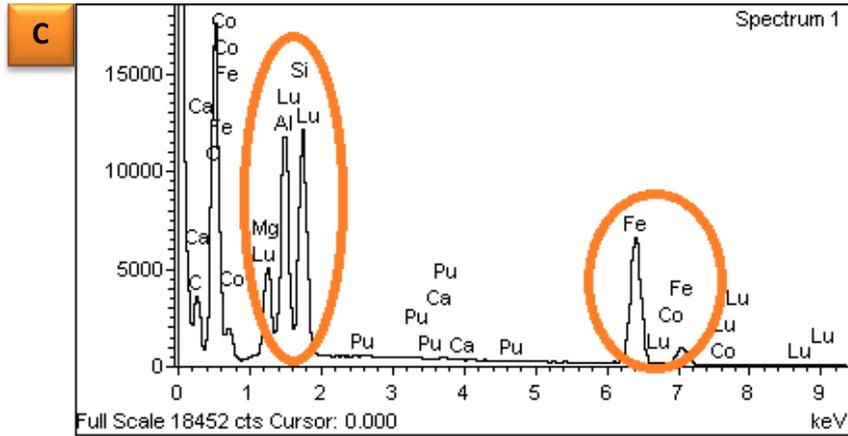
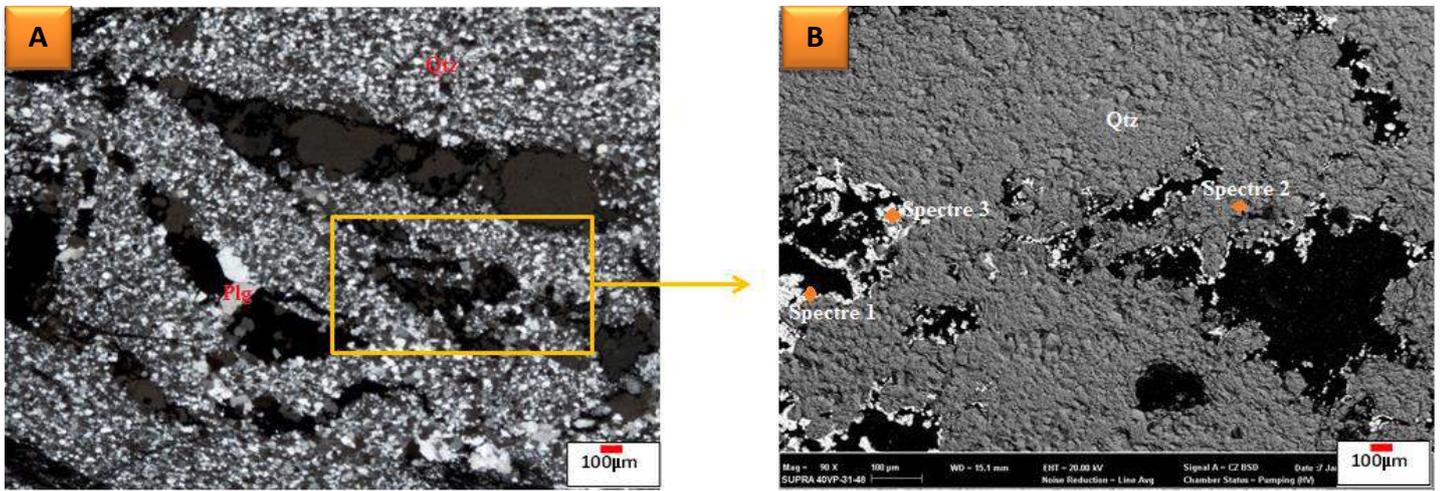


Figure 24 : Microphotographies et spectres de la roche R4 prise au Guéto

A : Vue en lumière polarisée (LP)    B : Agrandissement au MEB avec prise de spectres    C, D, E : Spectres visibles au MEB indiquant la présence d'éléments chimiques    Plg : Plagioclase    Qtz : Quartz

Tableau II : Éléments présents dans les échantillons de roche du Blafo et du Guéto (% de masse)

		Éléments chimiques									Total
		Na	Al	Si	K	Ti	Fe	Cu	Sr	O	
Type de roche	<b>R1</b>	1,49	10,47	32,94	2,7	0,55	1,03	0,36	1,51	48,94	100
	<b>R2</b>	-	-	44,4	-	-	2,49	-	1,52	51,58	100
	<b>R3</b>	0,71	5,28	38,76	1,35	0,32	1,71	-	1,52	50,35	100
	<b>R4</b>	0,22	1,59	43,48	0,37	-	1,03	-	1,62	51,69	100

Tableau III : Éléments majeurs des échantillons de roche du Blafo et du Guéto (en %)

		Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	SrO
		Type de roche	<b>R1</b>	2,01	19,79	70,46	3,56	3,25	0,92	1,33	1,48	0,07
<b>R2</b>	-		-	95,11	-	-	-	3,18	3,53	-	-	1,72
<b>R3</b>	0,96		9,97	82,91	8,31	1,63	0,53	2,20	2,44	0,25	-	1,80
<b>R4</b>	0,29		3,01	93,01	30,90	0,45	-	1,33	1,48	0,49	-	1,91

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a été calculé par : FeO x 1,11

Tableau IV : Teneur des ETM étudiés dans les roches prélevées au Blafo et au Guéto (en ppm)

Ech.	Cr	Ni	Pb	Zn	Cu	Cd	Fe	Mn	Sr	Ti	Mo	As	Hg
<b>R1</b>	54,45	37,42	30,97	24,48	28,18	2,17	19701	327,21	212,9	3296,18	21,34	3,15	< ld
<b>R2</b>	59,31	27,83	10,35	16,3	24,01	0,5	4667,67	203,46	4,3	< ld	16,63	4,3	< ld
<b>R3</b>	49,8	41,33	28,5	32,73	34,2	2,5	17767,67	145,19	104,33	914,91	11,26	4,65	< ld
<b>R4</b>	58,84	39,5	12,06	22,35	27,57	1,5	5601	198,68	27,37	341,42	18,2	2,83	< ld

ld = limite de détection

Les échantillons R1 et R3 sont les plus riches en Fe et Ti, avec des teneurs respectives, pour le Fe, de 19701 ppm et 17767,67 ppm, et, pour le Ti, 3296,18 ppm et 914,91 ppm. La teneur en Ti de l'échantillon R2 n'a pu être dosée, car elle est inférieure à la limite de détection. Tous les échantillons dosés contiennent de l'As, avec des teneurs, respectives, de 3,15 ppm, 4,3 ppm, 4,65 ppm et 2,83 ppm pour la roche R1, R2, R3 et R4. Le Hg n'a pu être décelé à cause de sa teneur inférieure à la limite de détection. Le Mn est aussi présent dans ces roches prélevées, avec des valeurs de 327,21 ppm, 203,46 ppm, 145,19 ppm, 198,68 ppm, respectivement, pour les échantillons R1, R2, R3 et R4.

### 5.1.5. Caractères géochimiques des roches prélevées

Les métasédiments (R1, R2, R3 et R4) prélevés et analysés sont caractérisés par des teneurs en SiO<sub>2</sub> variant de 70,46 % à 93,01 %, des teneurs en alcalins (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) de 0,74 % à 5,26 %, des teneurs en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 3,01 % à 19,79 % et en TiO<sub>2</sub> de 0 à 0,92 % (Tableau III). L'échantillon R2 a des teneurs nulles en alcalins (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O), en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et en TiO<sub>2</sub>, mais une forte teneur en silice (95,11 %). Une application du diagramme de Hugues aux métasédiments, matérialisée à la figure 25, indique que les alcalins ont un comportement anormal, car les roches sont toutes situées dans le champ indicateur de la zone d'altération. L'altération subie par ces métasédiments est donc bien significative. Du point de vue origine terrigène de ces sédiments métamorphisés, la classe distinctive de chaque échantillon est indiquée à la figure 26, à l'aide du diagramme log (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) - log (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/K<sub>2</sub>O) de Herron. Les valeurs calculées en log (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et en log (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/K<sub>2</sub>O) des métasédiments sont, respectivement, de (0,55; -0,34) pour l'échantillon R1; (0; 0), pour l'échantillon R2; (0,91; -0,17), pour l'échantillon R3 et (1,48; 0,51), pour l'échantillon R4.

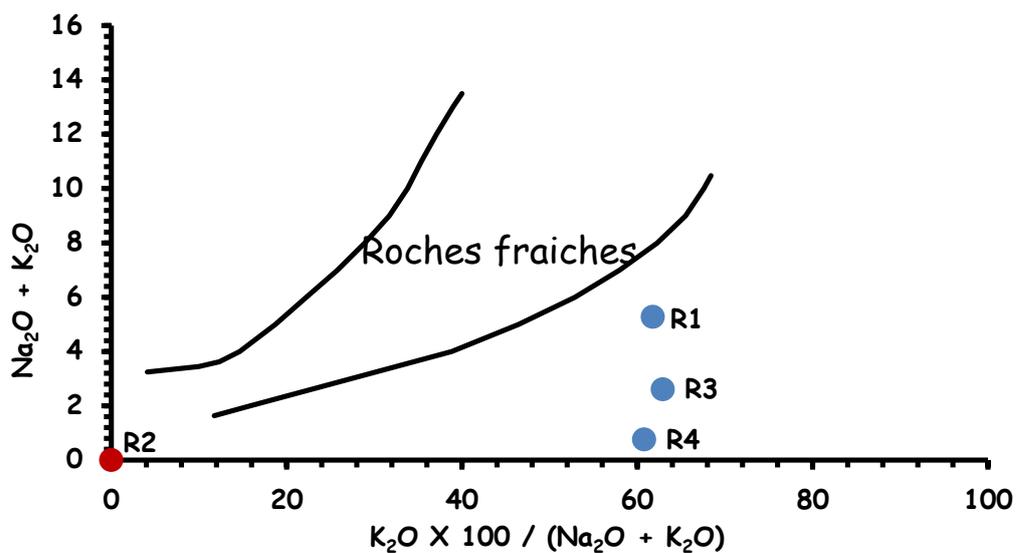


Figure 25 : Diagramme d'Hugues (1973) appliqué aux métasédiments étudiés

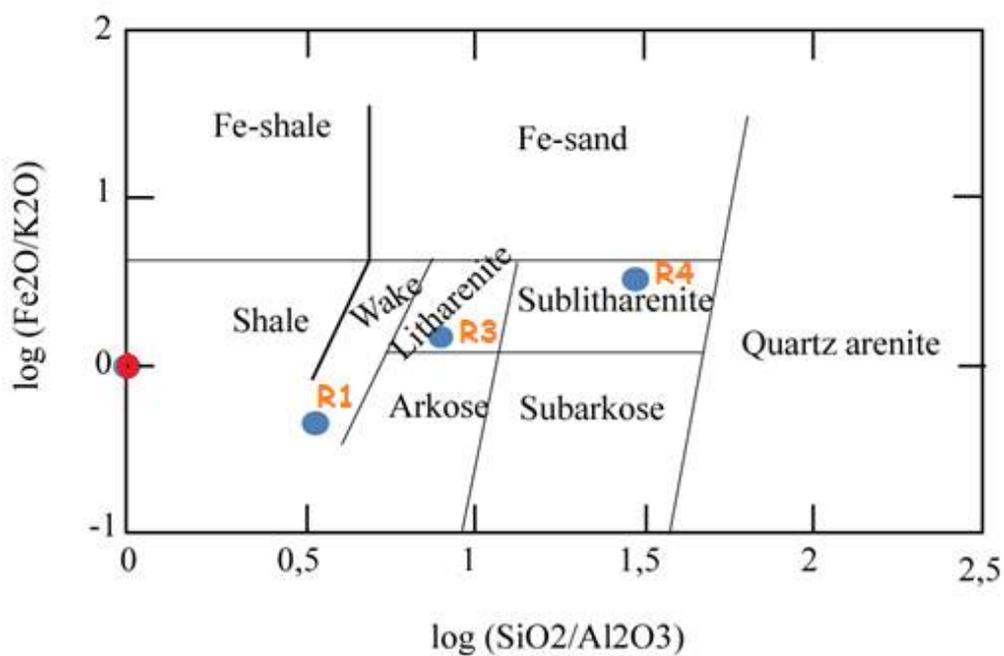


Figure 26 : Diagramme de Herron (1988) appliqué aux métasédiments étudiés

Concernant l'échantillon R2, les valeurs sont nulles du fait de l'inexistence de teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{K}_2\text{O}$ . Dès lors, sur le graphe du diagramme de Herron (1988), sa position ne reflète pas la réalité. En effet, vue macroscopiquement, cette roche est proche de l'échantillon R3. Ainsi, une classification des différents échantillons selon le diagramme  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ - $\log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$  indique que la R1 est représentative des grauwackes, la R3 est une litharénite, la R4 constitue une sublitharénite.

## **5.2. Caractères morphopédologiques des sols étudiés**

### **5.2.1. Coordonnées des profils de sols étudiés au Blafo et au Guéto**

Les références de positionnement des profils ouverts sur les collines Blafo et Guéto sont consignées dans le tableau V.

### **5.2.2. Caractérisation des sols étudiés au Blafo et au Guéto**

Les figures 27 et 28 indiquent les séquences des profils ouverts, respectivement, au Blafo et au Guéto. Les lettres A, B, C, suivies des chiffres, représentent la codification des horizons. Les horizons de surface ou horizons organo-minéraux, avec des subdivisions  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_3$ , sont notés A, les horizons intermédiaires entre A et C, les horizons argileux et d'accumulation, notés B ( $B_1$ ,  $B_2$ ) et les horizons proches de la roche mère, notés C. Les coupes de sol (profils) observés, ont respecté les normes d'un dispositif stratifié par segment topographique (sommet, haut de versant, mi- versant et bas de versant). Ainsi, l'appréciation des sols en fonction de la topographie est prise en compte. Les différentes altitudes, indiquant la position de chaque profil sont consignées dans le tableau V.

#### **5.2.2.1. Organisation de la toposéquence N108° du Blafo**

La description des horizons des différents profils de la séquence des sols étudiés au Blafo est rapportée par le tableau VI. Au niveau de cette séquence des sols, on s'aperçoit bien de la disposition des horizons de couverture, horizons de surface ou horizons organo-minéraux, suivant les 20 premiers centimètres de chaque profil de sol. À partir de cette profondeur, les horizons B formés ne sont pas entièrement individualisés, puisqu'ils contiennent des caractères de la roche mère sous-jacente. Ces horizons vont jusqu'à une profondeur variant de 60 à 70cm. Au-delà, on est en présence de l'horizon C.

Tableau V : Références géographiques des profils ouverts au Blafo et au Guéto

Site	Position topographique	Nom profil	Profondeur profil (cm)	Nombre d'horizons	Coordonnées UTM (m)		
					Longitude	Latitude	Altitude
<b>Blafo</b>	Sommet	B1	70	4	280 901	753 114	438
	Haut versant	B2	100	5	281 207	753 037	384
	Moyen versant	B3	120	6	281 520	752 983	292
	Bas versant	B4	70	5	281 822	752 898	220
<b>Guéto</b>	Sommet	G1	120	5	280 208	750 167	433
	Haut versant	G2	160	5	280 157	749 979	397
	1/3 >Mi versant	G3	200	4	280 137	749 769	324
	1/3 <Mi versant	G4	140	4	280 139	749 473	231
	Bas versant	G5	200	2	280 135	749 367	217

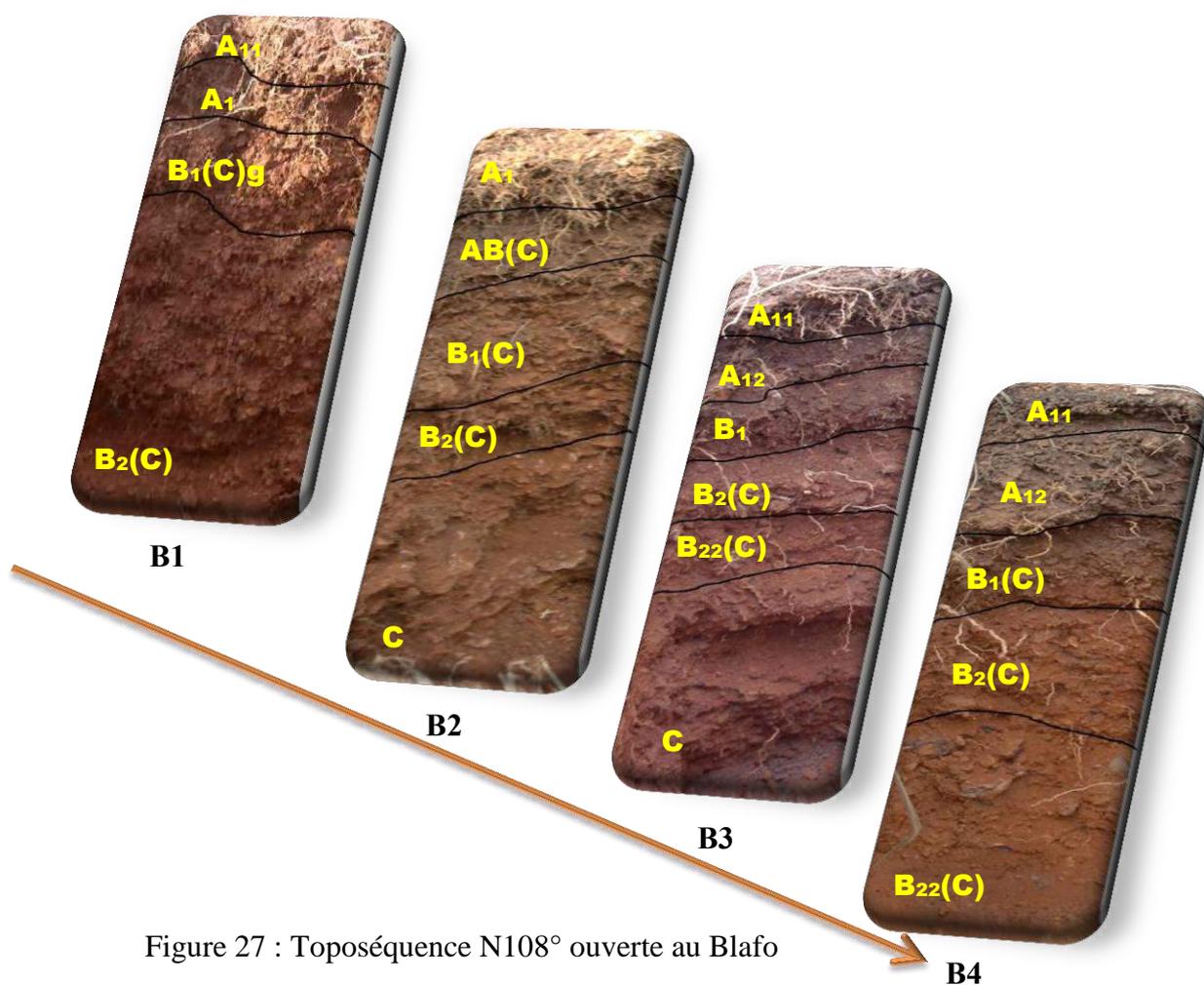


Figure 27 : Toposéquence N108° ouverte au Blafo

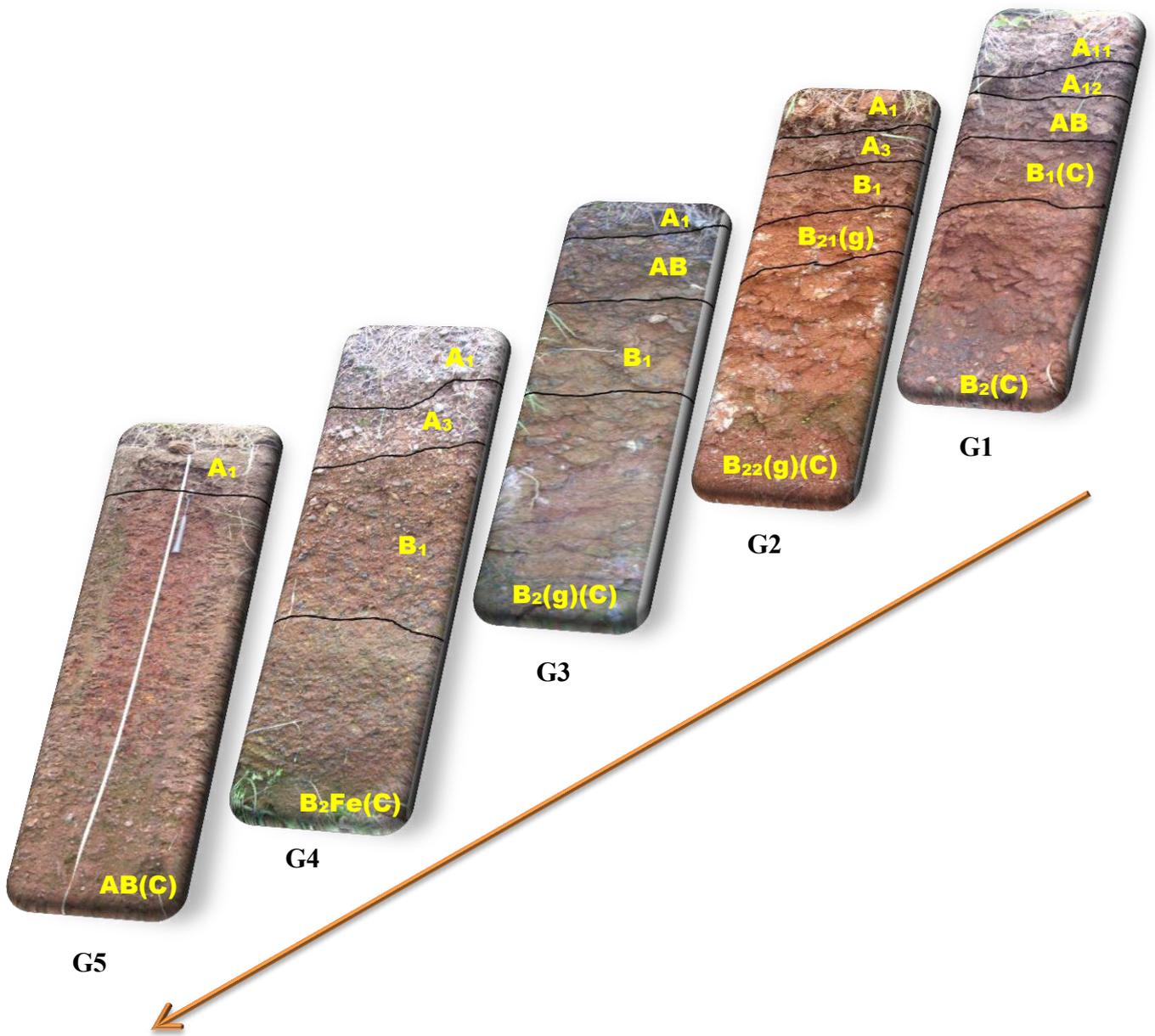


Figure 28 : Toposéquence N185° ouverte au Guéto

### 5.2.2.1.1. Description des caractères physiques des sols du Blafo

#### □ Couleur des sols et des tâches

Les sols observés au niveau de cette toposéquence, sont tous de couleur brune, avec des teintes de variations diverses.

Ainsi, au niveau du profil de sommet, c'est-à-dire le profil B1, les teintes sont jaunâtres dans les trois premiers horizons ( $A_{11}$ ,  $A_{12}$  et  $B_1(C)$ ), respectivement, 7,5YR 3/2 ; 5YR 4/3 et 5YR 4/4. En revanche, la teinte est rouge au niveau de l'horizon  $B_2(C)$ , avec une valeur de 2,5YR 3/4. Les horizons d'accumulation  $B_1(C)$  et  $B_2(C)$  sont tachetées, par des tâches ocre orangée, ocre jaune à ocre rouge, indiquant, pour l'horizon  $B_1(C)$ , un caractère de présence temporaire d'eau et, pour l'horizon  $B_2(C)$ , une tâche d'oxydation.

Au niveau du profil B<sub>2</sub>, profil de haut de versant, les teintes sont jaunâtres dans les horizons  $A_1$ ,  $B_1(C)$  et C, avec des valeurs respectives de 5YR 3/2, 10YR 3/1, 10YR 3/4. Par contre, les horizons  $AB(C)$  et  $B_2(C)$ , sont rougeâtres (2,5YR 2,5/2 ; 10R 4/4). Ici, en dehors de l'horizon  $A_1$ , tous les autres horizons sont tachetés par un phénomène d'oxydation.

S'agissant du profil de moyen versant, c'est-à-dire du profil B3, la teinte est uniforme sur tout le profil, avec des variations au niveau de la hue et du chroma. Dans l'ensemble, la teinte est rougeâtre (2,5YR). Les tâches sont présentes seulement au niveau des trois derniers horizons ( $B_2(C)$ ,  $B_{22}(C)$  et C), de couleur jaunâtre.

Concernant le profil B4 situé au bas de versant, l'horizon  $A_{11}$  est jaunâtre (7,5YR 4/1) et les quatre autres  $A_{12}$ ,  $B_1(C)$ ,  $B_2(C)$  et  $B_{22}(C)$  sont rougeâtres (2,5YR 3/2 ; 5YR 4/6 ; 2,5YR 4/6 ; 5YR 4/6), avec des tâches sur les trois derniers horizons, respectivement, beige, jaune beige, jaune à noir.

En définitive, le constat est que, les sols du sommet et du haut de versant du *Blafo* sont caractérisés par des teintes jaunâtres, tandis que ceux des moyen et bas de versant sont rougeâtres.

#### □ Structure des sols décrits

Au niveau de la structure, les horizons de surface, humifères, ont une tendance grumeleuse, tandis que les horizons de profondeur, c'est-à-dire, les horizons B et C, sont polyédriques, plus ou moins sub-anguleux.

Tableau VI : Principaux caractères macromorphologiques des sols décrits au Blafo

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Couleur	Struct.	Texture	Cohésion	Porosité	Transition horizon	Classe drainage	% éléments grossiers	Tâches
B1	A <sub>11</sub>	0 - 5	B	G	SLA	C	TP	Pr	1,8	69,23	-
	A <sub>12</sub>	5 - 20	BR	G	ASL	PC	TP	Pr	1,6	84,62	-
	B <sub>1</sub> (C)g	20 - 39	BRT	P	ASL	PC	PP	Pr	2,3	83,33	OO/OJ
	B <sub>2</sub> (C)	39 - 70	BRB	P	ASL	PC	PP	-	7,5	71,33	OJ/OR
B2	A <sub>1</sub>	0 - 7	BS	G	ALS	C	P	Pr	1,8	70,00	-
	AB(C)	7 - 20	BRT	PS	ALS	PC	PP	Pr	2,2	83,33	JV
	B <sub>1</sub> (C)	20 - 50	BRT	PS	ASL	PC	PP	Pr	4,5	80,00	JO/JV
	B <sub>2</sub> (C)	50 - 60	BRT	PS	ASL	PC	PP	Pr	4,0	78,57	J
	C	60 - 100	BRT	PS	ASL	PC	PP	-	5,5	65,2	JO
B3	A <sub>11</sub>	0 -10	BS	PS±G	ALS	C	P	N	1,7	68,14	-
	A <sub>12</sub>	10 - 22	BR	PS	ALS	PC	P	Pr	1,7	73,54	-
	B <sub>1</sub>	22 - 35	BR	PS	ALS	PC	P	Pr	1,6	72,25	-
	B <sub>2</sub> (C)	35 - 55	BRT	PS	ALS	PC	PP	D	3,5	71,33	J
	B <sub>22</sub> (C)	55 - 70	BRT	PS	A	PC	TP	Pr	6,5	67,85	J
	C	70 - 120	BI	PA	A	PC	TP	-	8,5	66,33	J
B4	A <sub>11</sub>	0 - 5	S	G	ALS	C	P	Pr	1,6	72,73	-
	A <sub>12</sub>	5 - 15	BS	P	ASL	PC	P	N	1,6	91,67	-
	B <sub>1</sub> (C)	15 - 30	BO	PS	AS	C	P	D	2,2	84,62	BE/J
	B <sub>2</sub> (C)	30 - 50	BR	PS	AS	C	P	D	2,5	81,82	JB/J
	B <sub>22</sub> (C)	50 - 70	BA	PS	AS	C	TP	-	5,5	79,33	J/NO

Différentes codifications ont été utilisées pour des besoins d'insertion dans les tableaux. Ainsi, au niveau de la :

- **Couleur** : B = Brun ; BA = Bariolée ; BI = Bigarré ; BO = Brun orangé ; BS = Brun sombre ; BR = Brun rouge ; BRT = Brun rouge tachetée ; BRB = Brun rouge bariolée ; BST = Brun sombre tachetée ;
- **Structure** : G = Grumeleuse ; P = Polyédrique ; PS = Polyédrique subanguleux ; PS±G = polyédrique subanguleux à tendance grumeleuse ; PA = polyédrique anguleux ;
- **Texture** : A = Argileux ; AS = Argilo-sableux ; SA = Sablo-argileux ; SLA = Sablo-limono-argileux ; ASL = Argilo-sablo-limoneux ; LSA = Limono-sablo-argileux ;
- **Cohésion** : C = Cohérent ; PC = Peu cohérent ; TC = Très cohérent ;
- **Porosité** : P = Poreux ; PP = Peu poreux ; TP = Très poreux ;
- **Transition entre les horizons** : Pr = Progressive, N = Nette ; D = Diffuse
- **Tâches** : OO = Ocre orangée ; OJ = Ocre jaune ; OR = Ocre rouge ; JO = Jaune orangée ; JV = Jaune violacée ; J= Jaune ; BE = Beige ; NO = Noir ; GL = Gley ; VI = Violet.

Ainsi, le profil B1 a ses horizons A<sub>11</sub> et A<sub>12</sub> qui sont grumeleux, jusqu'à 20 cm de profondeur. Au-delà, jusqu'à 70 cm, la structure est polyédrique. Pour les autres profils, ce sont seulement les premières tranches de sol, allant de 0 à 5, ou 0 à 10 cm, qui sont grumeleuses. Ces tranches composent les horizons organo-minéraux et les autres tranches sont polyédriques subanguleux.

#### **□ Texture et cohésion des sols décrits**

Dans ce paragraphe, sont présentées les textures décrites sur le terrain, de façon tactile. Dans l'ensemble, la texture est davantage argileuse, à argilo-sableuse dans les horizons intermédiaires et de profondeur, et sablo-argileuse dans les horizons de surface.

Au niveau de la cohésion, seuls, les premiers horizons de chacun des profils, jusqu'à la profondeur variant de 5 à 10 cm sont cohérents. En revanche, ils sont peu cohérents dans les autres horizons, à l'exception du profil de bas de versant (profil B4), qui est cohérent, à partir de 15 cm jusqu'à 70 cm.

#### **□ Porosité, transition entre les horizons et classe de drainage**

Tous les horizons décrits sont relativement poreux, avec des variantes : les horizons organo-minéraux sont poreux à très poreux et les horizons d'accumulations, peu poreux, à l'exception des horizons du profil B4, qui sont poreux à très poreux.

Les transitions entre les couches sont, progressives entre les trois premières couches des profils, et diffuses en profondeur, surtout au niveau du profil B4. Le drainage est bon dans les deux premiers horizons, avec une classe de drainage variant entre 1 et 2, moyen dans les horizons d'accumulation ou horizon B, avec des valeurs de la classe de drainage variant de 2 à 4. Au-delà de 5, le drainage est très mauvais et concerne les horizons C.

#### **□ Appréciation du taux d'éléments grossiers**

Les sols étudiés sont fortement pourvus en éléments grossiers. Les pourcentages les plus faibles sont autour de 65 %, avec un taux, très fort dans les horizons d'accumulation et horizons intermédiaires (tableau VI et figures 29A, B, C, D).

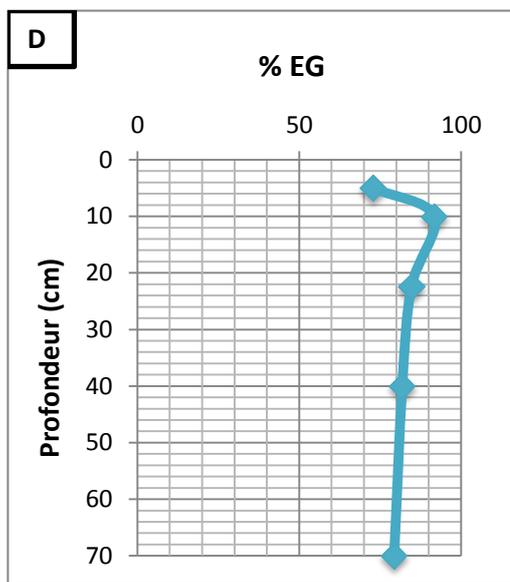
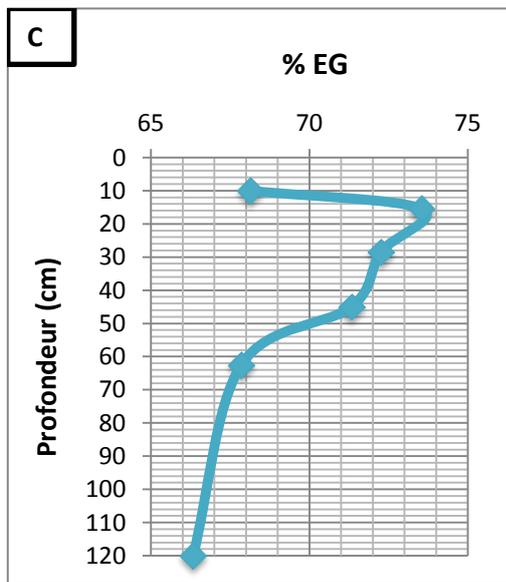
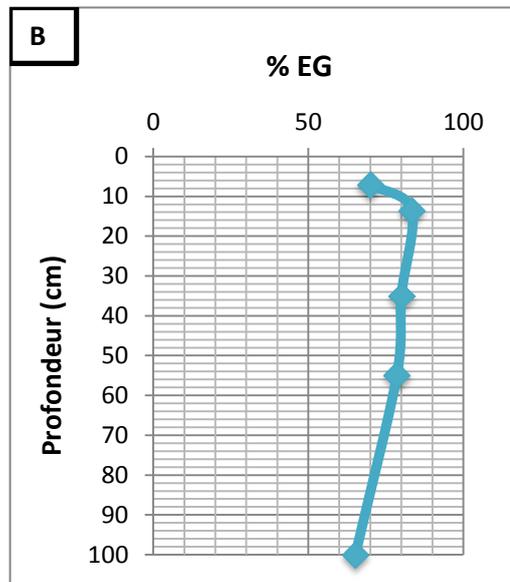
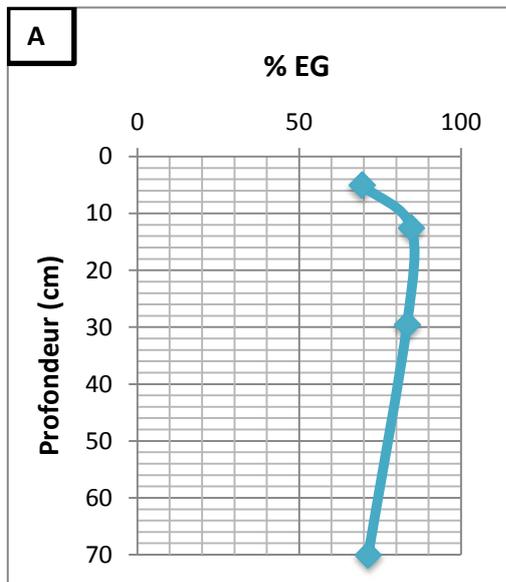


Figure 29 : Dynamique verticale des éléments grossiers (EG) dans les sols du Blafo

A : Profil du sommet (B1)      B : Profil du haut versant (B2)  
 C : Profil du moyen versant (B3)    D : Profil du bas versant (B4)

L'appréciation des pourcentages cumulés dans les horizons organo-minéraux (A), ceux d'accumulation (B) et d'altération (C) sont consignés dans le tableau VII ; la dynamique latérale de ces éléments grossiers, depuis le sommet jusqu'au bas de versant, est représentée sur la figure 30. Sur le graphe, on se rend bien compte d'une évolution latérale de ces éléments grossiers, du sommet jusqu'au bas de versant. Au sommet, au haut de versant et au bas de versant, le pourcentage des éléments est plus élevé dans l'horizon B, que ceux de l'horizon de moyen versant.

Ces éléments grossiers sont constitués de concrétions et débris ferro-manganiques, de taille millimétrique à centimétrique.

#### □ Type de sols décrits au Blafo

Les horizons de sols décrits sont, dans l'ensemble, brunifiés, présentant, par endroits, des indurations et cuirassements (profil B1). Sur la base de la classification de la Commission de Pédologie et de Cartographie des sols (CPCS), plusieurs sous-groupes de ces sols ont été observés. Ainsi, les sous-groupes décrits indiquent, un sol remanié, rajeuni, à faciès induré au niveau du profil du sommet (B1). Le profil de haut de versant (B2) est simplement remanié et rajeuni, tandis qu'il est rajeuni, à faciès remanié, au niveau du profil de moyen versant (B3). Le sol est rajeuni, à faciès remanié au bas de versant (B4).

La reconversion de ces sols décrits, référée dans le système "World Reference Base" (WRB), donne comme équivalent à ces sols brunifiés, des cambisols. Les types de sols décrits sont ainsi consignés dans le tableau VIII.

#### 5.2.2.1.2. Appréciation des caractères physico-chimiques des sols du Blafo

Les données du tableau IX expriment les valeurs du potentiel hydrogène (pH) et du potentiel d'oxydo-réduction (Eh) de chaque échantillon de sol étudié au Blafo. Ces valeurs moyennes indiquées pour chaque tranche d'horizon, permettent ainsi d'apprécier la dynamique verticale de chacun de ces paramètres par profil. Pour la dynamique latérale, les valeurs y afférentes sont consignées dans le tableau X. L'analyse de la variance (ANOVA), grâce au test de Fischer, à la probabilité  $P < 0,05$ , indique que toutes les valeurs présentées sont hautement significatives et différentes, pour chacun des paramètres étudiés.

Tableau VII : Éléments grossiers par horizons (Blafo)

Profil	Horizon	Profondeur (cm)	% éléments grossiers
B1	A	0 - 20	76,93
	B	20 - 70	77,33
B2	A	0 - 20	76,67
	B	20 - 60	79,29
	C	60 - 100	65,20
B3	A	0 - 22	70,84
	B	22 - 70	70,48
B4	C	70 - 120	66,33
	A	0 - 15	82,20
	B	15 - 70	81,92

Tableau VIII : Sols décrits au Blafo

Profil	Type de classification	
	CPCS (1967)	WRB (2006)
B1	Sol brunifié, remanié, rajeuni à faciès induré	Cambisol pisoplinthique
B2	Sol brunifié, remanié, rajeuni	Cambisol manganiférique
B3	Sol brunifié, rajeuni à faciès remanié	Cambisol manganiférique
B4	Sol brunifié, remanié, induré à faciès rajeuni	Cambisol plinthique

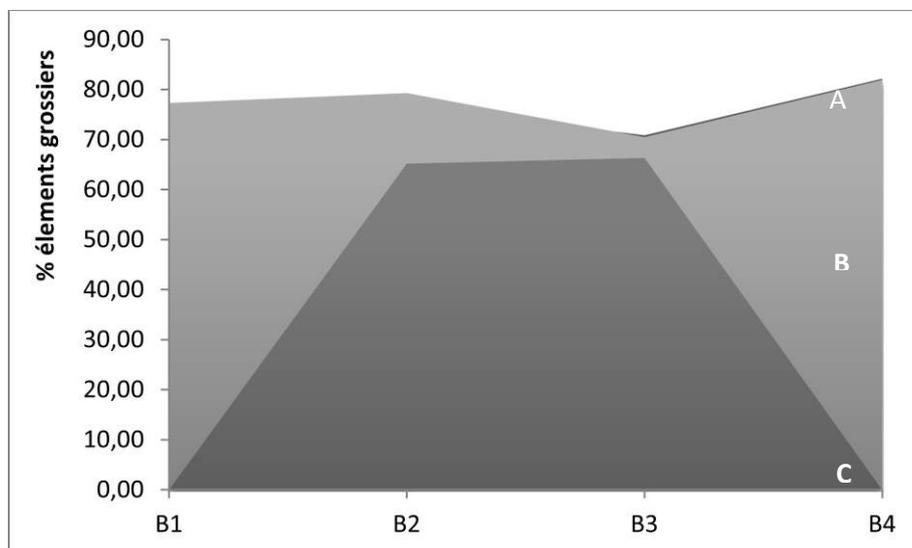


Figure 30 : Dynamique latérale des éléments grossiers le long de la toposéquence au Blafo

### ❑ Degré d'acidité des sols du Blafo

Les valeurs du pH, consignés dans les tableaux IX et X, sont toutes inférieures à 7, indiquant ainsi que, les sols étudiés sont acides.

Au niveau du Blafo, seuls les horizons du profil de sommet (B1) se rapprochent de la valeur 7. Ces valeurs sont comprises entre 6,05 et 6,33. La dynamique verticale, à ce niveau, indique une croissance d'acidité des horizons organo-minéraux ( $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ), vers les horizons d'accumulation (horizons B). C'est la même tendance pour les profils du haut de versant (B2), et du moyen versant (B3). Mais, pour ces 2 profils, ils sont plus acides que le profil de sommet, et les valeurs varient de 5,26 à 5,80. Dans l'ensemble, les horizons organo-minéraux sont moins acides, que les horizons situés en profondeur (tableau X et figure 31).

### ❑ Degré d'oxydation et de réduction des sols du Blafo

Les valeurs indicatrices du potentiel d'oxydo-réduction ou potentiel redox des échantillons sols du Blafo sont comprises entre 26 et 126 mV. L'analyse des valeurs Eh (tableau IX) indique, une augmentation du potentiel redox, des horizons organo-minéraux vers les horizons d'accumulation, puis des horizons de profondeur vers les horizons d'accumulation.

Ainsi, au niveau du profil B1, les horizons  $B_1(C)g$  et  $B_2(C)$  ont les valeurs croissantes. Il n'y a que l'horizon  $A_{11}$  qui fait exception à cette tendance générale observée. Au niveau du profil B2, ce sont les horizons AB(C),  $B_1(C)$  et  $B_2(C)$  qui ont les valeurs élevées. C'est aussi le cas des horizons  $B_1$ ,  $B_2(C)$  du profil B3 et  $B_1(C)$  du profil B4.

La dynamique latérale du potentiel redox (figure 32) montre que les valeurs les plus faibles concernent les profils du sommet et du moyen versant, et que, ces valeurs sont plus élevées au niveau du haut versant et du bas de versant. Le constat est le même, avec des valeurs élevées, qui concernent les horizons d'accumulation. Toutefois, du profil B3 au profil B4, ce sont les horizons de surface qui ont un fort taux du potentiel redox, comparé aux horizons de profondeur.

Tableau IX : pH et Eh des horizons des profils du Blafo

Profil	Horizon	Prof. (cm)	pH	Eh (mV)
B1	A <sub>11</sub>	0 - 5	6,33 <sup>a</sup>	36,33 <sup>a</sup>
	A <sub>12</sub>	5 - 20	6,33 <sup>a</sup>	26,80 <sup>b</sup>
	B <sub>1</sub> (C) <sub>g</sub>	20 - 39	6,27 <sup>b</sup>	28,07 <sup>c</sup>
	B <sub>2</sub> (C)	39 - 70	6,05 <sup>c</sup>	40,11 <sup>d</sup>
B2	A <sub>1</sub>	0 - 7	5,62 <sup>a</sup>	64,80 <sup>a</sup>
	AB(C)	7 - 20	5,67 <sup>b</sup>	65,10 <sup>b</sup>
	B <sub>1</sub> (C)	20 - 50	5,26 <sup>c</sup>	87,70 <sup>c</sup>
	B <sub>2</sub> (C)	50 - 60	5,62 <sup>a</sup>	66,90 <sup>d</sup>
	C	60 - 100	5,65 <sup>bd</sup>	64,81 <sup>a</sup>
B3	A <sub>11</sub>	0 - 10	5,82 <sup>a</sup>	55,13 <sup>a</sup>
	A <sub>12</sub>	10 - 22	5,74 <sup>b</sup>	58,27 <sup>b</sup>
	B <sub>1</sub>	22 - 35	5,71 <sup>c</sup>	62,79 <sup>c</sup>
	B <sub>2</sub> (C)	35 - 55	5,69 <sup>cd</sup>	61,81 <sup>d</sup>
	B <sub>22</sub> (C)	55 - 70	5,80 <sup>a</sup>	55,79 <sup>e</sup>
	C	70 - 120	5,80 <sup>a</sup>	55,71 <sup>e</sup>
B4	A <sub>11</sub>	0 - 5	5,32 <sup>a</sup>	86,38 <sup>a</sup>
	A <sub>12</sub>	5 - 15	4,73 <sup>b</sup>	119,70 <sup>b</sup>
	B <sub>1</sub> (C)	15 - 30	4,61 <sup>c</sup>	126,11 <sup>c</sup>
	B <sub>2</sub> (C)	30 - 50	5,63 <sup>d</sup>	66,12 <sup>d</sup>
	B <sub>22</sub> (C)	50 - 70	5,80 <sup>e</sup>	57,01 <sup>e</sup>

Les lettres a, b, c, d, e matérialisent la différence de significativité entre les moyenne d'un même profil

Tableau X : pH et Eh des horizons de surface (Hs) et de profondeur (Hp) du Blafo

Profil	Horizon	Profondeur (cm)	pH	Eh (mV)
B1	Hs	0 - 20	6,33	31,57
	Hp	20 - 70	6,16	34,09
B2	Hs	0 - 20	5,65	64,95
	Hp	20 - 100	5,51	73,14
B3	Hs	0 - 22	5,78	56,70
	Hp	22 - 120	5,75	59,03
B4	Hs	0 - 15	5,03	103,04
	Hp	15 - 30	5,34	83,08

Hs : horizon de surface organo-minéral

Hp : horizon de profondeur

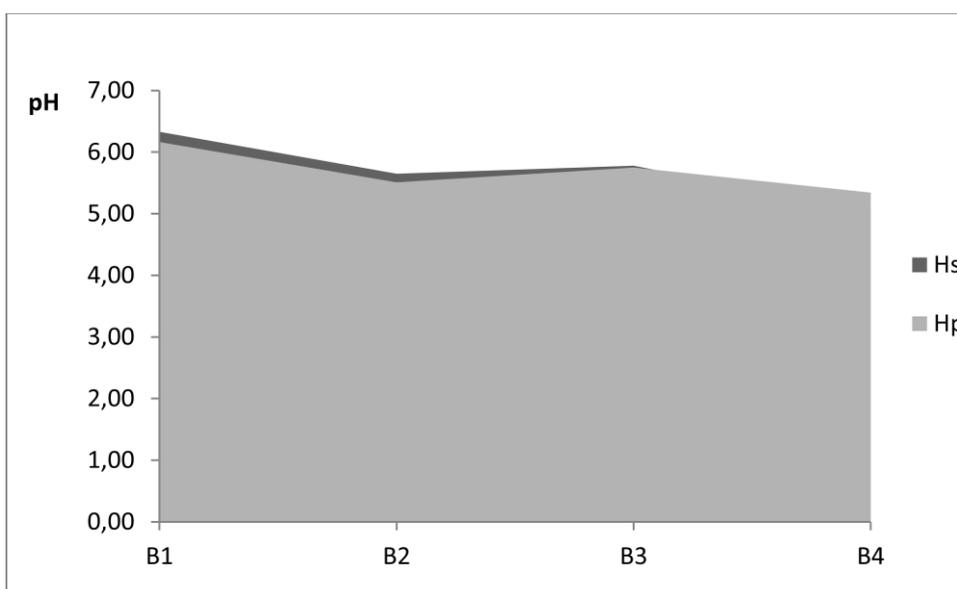


Figure 31 : Dynamique latérale du degré d'acidité des sols le long de la toposéquence au Blafo

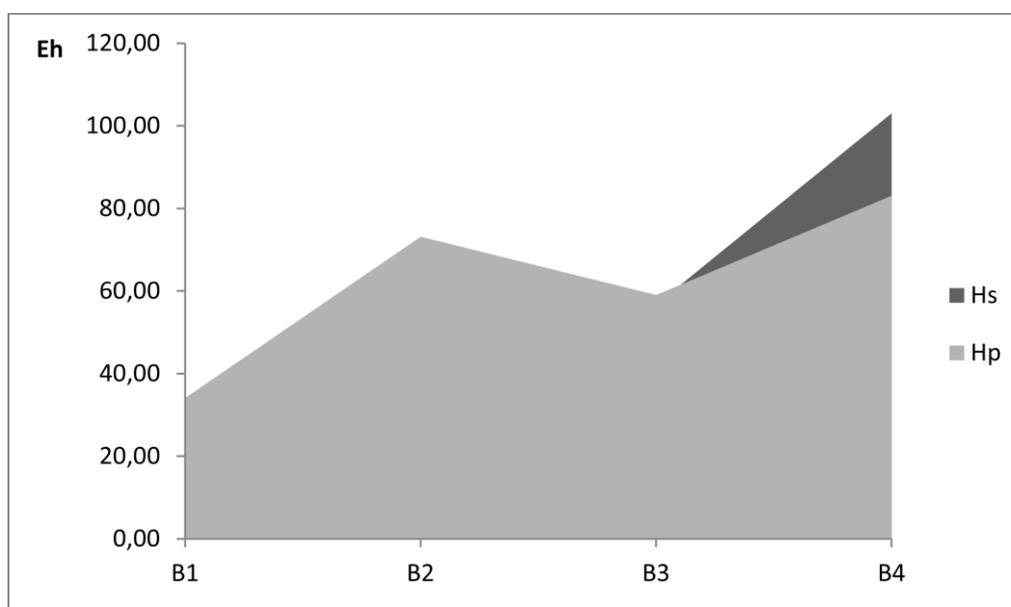


Figure 32 : Dynamique latérale du potentiel redox des sols le long de la toposéquence au Blafo

### ❑ Étude comparative de la dynamique verticale entre le pH et le Eh

La prise en compte des comportements simultanés du pH et du Eh, par horizon, de chacun des profils de la toposéquence du Blafo, est mentionné sur la figure 33. Il ressort de l'examen de cette figure, de la valeur quasi identique du pH, tournant autour de 5 à 6. Par contre, les valeurs du Eh sont variables et, l'étude comparative indique des valeurs du pH qui augmentent, pendant que celles du Eh diminuent et, inversement.

### 5.2.2.2. Organisation de la toposéquence N185° du Guéto

Le tableau XI rend compte des différentes descriptions des sols observés au niveau du Guéto. Les horizons organo-minéraux se situent dans les 25 premiers centimètres. À partir de cette profondeur, l'on rencontre les horizons d'accumulation où, dans certains cas, l'on observe quelques caractères de la roche sous-jacente. Les profils ouverts ici sont plus profonds et peuvent même atteindre 200 cm.

#### 5.2.2.2.1. Description des caractères physiques des sols du Guéto

##### ❑ Couleur des sols et des tâches

Les sols décrits au Guéto sont semblables à ceux du Blafo au niveau de la couleur, de type brun, présentant des teintes de variations diverses.

Les teintes des horizons sont jaunâtres au niveau du profil de sommet (profil G1), pour les trois premiers horizons (A<sub>11</sub>, A<sub>12</sub> et AB), respectivement, de 7,5YR 3/2 ; 7,5YR 4/2 ; 5YR 4/2 et 7,5YR 4/3. Par contre, la teinte a une valeur de 2,5YR 3/4 et 10R 4/6, respectivement, au niveau des horizons B<sub>1</sub>(C) et B<sub>2</sub>(C). Elle est donc de couleur rouge. Des tâches d'oxydation ocre jaune et ocre rouge sont observées dans ces horizons d'accumulation.

Au niveau du haut de versant (profil G2), les teintes sont rougeâtres dans tous les horizons. Les valeurs sont, respectivement, 2,5YR 3/2 ; 2,5YR 3/2 ; 2,5YR 4/3 ; 10R 4/6 ; 2,5YR 4/6. Ces horizons sont tachetés, à l'exception de l'horizon A<sub>1</sub>, et ces tâches, signe d'une hydromorphie plus ou moins temporaire, varient de l'ocre jaune au bleu-vert gris (tâches de gley), en passant par l'ocre violet et le beige.

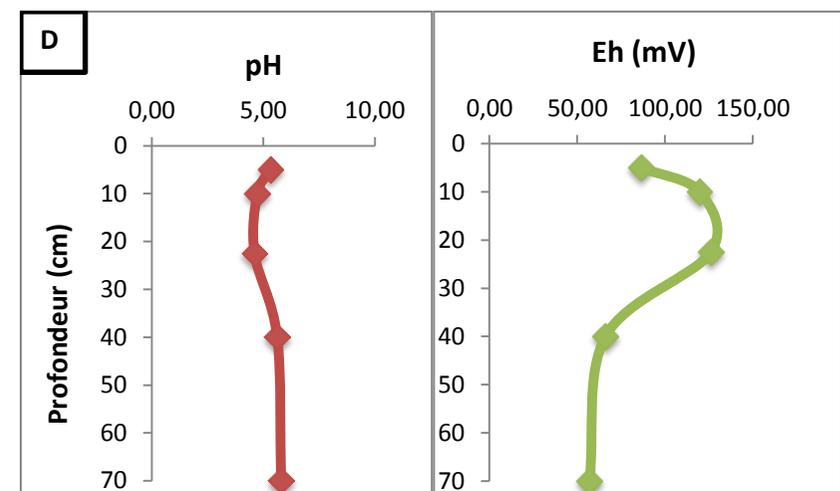
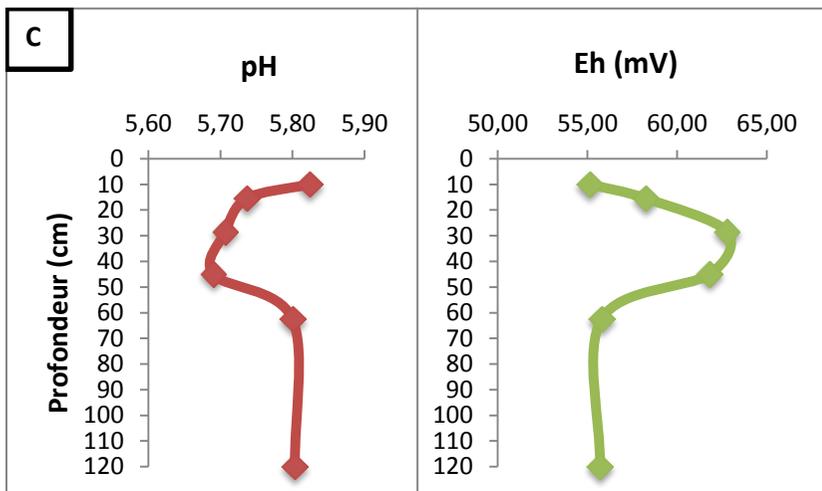
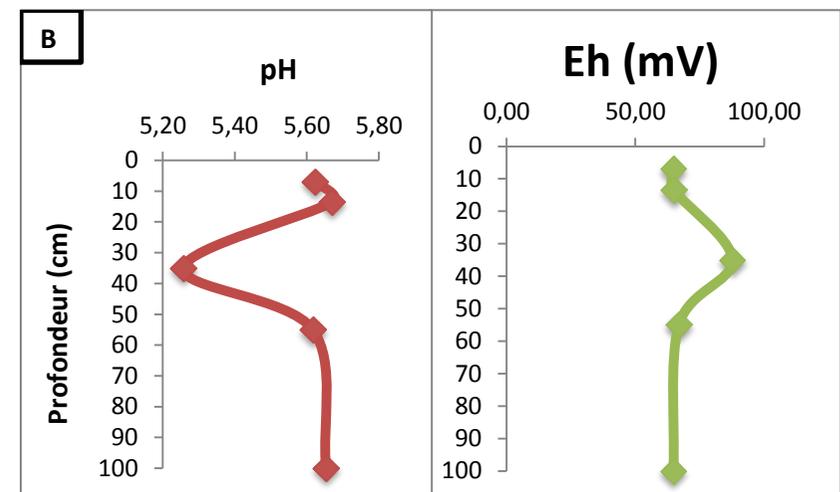
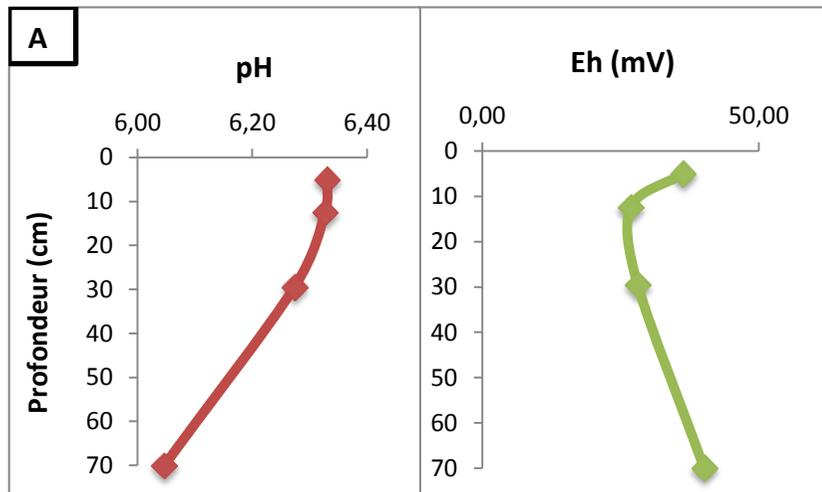


Figure 33 : Comparaison pH/Eh de chaque profil de la toposéquence du Blafo

A : Profil du sommet (B1) B : Profil du haut versant (B2) C : Profil du moyen versant (B3) D : Profil du bas versant (B4)

Le tiers (1/3) supérieur du moyen versant, au niveau duquel se trouve le profil G3, est de couleur rougeâtre, avec des tâches d'hydromorphie qui vont du violet au gley et à l'ocre orangé. Les teintes des horizons A<sub>1</sub>, AB, B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub>(g)(C) sont, respectivement, 2,5YR 4/3 ; 2,5YR 4/4 ; 2,5YR 5/6 et 2,5YR 5/4.

Quant au tiers (1/3) inférieur du moyen versant, il comporte des sols dont, les horizons sont rougeâtres, avec la présence d'un horizon induré. Les teintes sont, respectivement, 7,5YR 4/3 ; 2,5YR 4/4 et 10R 5/4, pour les horizons A<sub>1</sub>, A<sub>3</sub> et B<sub>1</sub>. Le dernier horizon étant induré. Les tâches ici, ocre jaune et noire, constituent des tâches d'oxydation.

Enfin, pour le dernier profil (G4) situé au bas de versant, l'horizon A<sub>1</sub> est jaunâtre (7,5YR 3/3) tandis que l'horizon AB(C) induré, est de couleur rouge (2,5YR 4/4), avec des tâches d'oxydation de couleurs ocre jaune, ocre violet et noir.

Dans le cas des sols du Guéto, ce sont seulement les sols du sommet qui sont caractérisés par des teintes jaunâtres, tandis que ceux de haut, moyen et bas de versant sont de couleurs rougeâtres.

#### ❑ **Structure des sols décrits**

Les horizons des sols, au niveau du Guéto, montrent, une structure polyédrique subanguleuse, à tendance grumeleuse, pour les horizons organo-minéraux, et, pour ceux de type AB. La structure est polyédrique subanguleuse dans les horizons B.

#### ❑ **Texture et cohésion des sols décrits**

Les différentes textures décrites montrent que, dans les 10 à 15 premiers centimètres des horizons des profils G1, G2, G3 et G4, la texture est limono-sablo-argileuse, exceptée l'horizon A<sub>1</sub> du profil G5, qui est sablo-argileux. Par contre, elle est sablo-argileuse, de 15 à 25 cm, et argilo-sableuse, sur une profondeur atteignant 160 à 200 cm, pour tous les profils décrits.

Les horizons, sont peu cohérents au niveau des profils G1 et G2, de 0 à 40-43 cm.

Tableau XI : Principaux caractères macromorphologiques des sols décrits au Guéto

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Couleur	Struct.	Textur.	Cohésion	Porosité	Transition horizon	Classe drainage	% éléments grossiers	Tâches
G1	A <sub>11</sub>	0 - 10	B	PS±G	LSA	PC	TP	Pr	1,6	75,00	-
	A <sub>12</sub>	10 - 25	BS	PS±G	SA	PC	TP	D	1,6	84,62	-
	AB	25 - 40	BST	PS±G	AS	PC	TP	N	1,8	85,57	OJ/OR
	B <sub>1</sub> (C)	40 - 65	BRT	PS	AS	C	P	Pr.	2,5	83,33	OR/OJ
	B <sub>2</sub> (C)	65 - 120	BRT	PS	AS	C	PP	-	3,5	83,33	OR/OJ
G2	A <sub>1</sub>	0 - 10	BS	PS±G	LSA	PC	TP	Pr	1,6	70,00	-
	A <sub>3</sub>	10 - 25	BST	PS±G	SA	PC	TP	Pr	1,8	81,82	OJ/BE
	B <sub>1</sub>	25 - 43	BST	PS±G	AS	PC	TP	N	1,8	81,82	OJ/OV
	B <sub>21</sub> (g)	43 - 70	BRT	PS	AS	C	P	D	2,5	66,66	GL/BE
	B <sub>22</sub> (g)(C)	70 - 160	BRT	PS	AS	C	P	-	5,5	66,67	GL/BE
G3	A <sub>1</sub>	0 - 20	BS	PS±G	LSA	C	TP	Pr	1,6	66,67	-
	AB	20 - 60	BS	PS±G	AS	C	TP	Pr	1,6	76,92	-
	B <sub>1</sub>	60 - 100	BRT	PS	AS	TC	P	Pr	1,8	63,64	VI/OR
	B <sub>2</sub> (g)(C)	100 - 200	BRT	PS	AS	TC	P	-	4,5	72,73	VI/GL/OR
G4	A <sub>1</sub>	0 - 15	BS	PS±G	LSA	C	P	D	1,6	63,63	-
	A <sub>3</sub>	15 - 47	BR	PS	SA	C	P	Pr	1,8	80,00	-
	B <sub>1</sub>	47 - 100	BRT	PS	AS	C	PP	Pr	4,5	76,92	OJ/NO
	B <sub>2</sub> FeC	100 - 140				Horizon induré				78,57	-
G5	A <sub>1</sub>	0 - 15	BS	PS±G	SA	PC	PP	N	1,60	78,57	-
	AB(C)	15 - 200	BRT	PS	AS	TC	PP	-	6,50	83,33	OJ/OV/NO

Différentes codifications ont été utilisées pour des besoins d'insertion dans les tableaux. Ainsi, au niveau de la :

- **Couleur** : B = Brun ; BA = Bariolée ; BI = Bigarré ; BO = Brun orangé ; BS = Brun sombre ; BR = Brun rouge ; BRT = Brun rouge tachetée ; BRB = Brun rouge bariolée ; BST = Brun sombre tachetée ;
- **Structure** : G = Grumeleuse ; P = Polyédrique ; PS = Polyédrique subanguleux ; PS±G = polyédrique subanguleux à tendance grumeleuse ; PA = polyédrique anguleux ;
- **Texture** : A = Argileux ; AS = Argilo-sableux ; SA = Sablo-argileux ; SLA = Sablo-limono-argileux ; ASL = Argilo-sablo-limoneux ; LSA = Limono-sablo-argileux ;
- **Cohésion** : C = Cohérent ; PC = Peu cohérent ; TC = Très cohérent ;
- **Porosité** : P = Poreux ; PP = Peu poreux ; TP = Très poreux ;
- **Transition entre les horizons** : Pr = Progressive, N = Nette ; D = Diffuse
- **Tâches** : OO = Ocre orangée ; OJ = Ocre jaune ; OR = Ocre rouge ; JO = Jaune orangée ; JV = Jaune violacée ; J= Jaune ; BE = Beige ; NO = Noir ; GL = Gley ; VI = Violet.

L'horizon A<sub>1</sub> du profil G5 est peu cohérent, de 0 à 15 cm. Le profil G4 est entièrement cohérent, à l'exception de son dernier horizon (B<sub>2</sub>FeC), situé entre 100 à 200 cm, qui est induré. Les horizons d'accumulation (horizons B) des profils G1, G2 sont cohérents et les horizons du profil G3 sont cohérents, de 0 à 60 cm, très cohérents, à partir de 60 cm, jusqu'à 200 cm. Aussi, l'horizon AB(C) du profil G5, qui va de 15 à 200 cm, est-il très cohérent.

#### ❑ Porosité, transition entre les horizons et classe de drainage

La tendance au niveau de la porosité est très forte à forte dans tous les profils, excepté le cas du profil de bas de versant (G5), qui est peu poreux, ainsi que l'horizon B1 du profil G4.

Les transitions entre les couches sont progressives, au niveau des trois premières couches du profil G3, entre les deux premières couches du profil G2, et entre la première et la deuxième couche du profil G1. La transition est progressive entre les couches A<sub>3</sub> et B<sub>1</sub> du profil G4. Par contre, elle est diffuse entre les couches A<sub>12</sub> et AB du profil G1, entre les couches B<sub>21</sub>(g) et B<sub>22</sub>(g)(C) du profil G2, et entre la couche A<sub>1</sub> et A<sub>3</sub> du profil G4. La transition est nette entre la couche AB et B<sub>1</sub>(C) du profil G1, entre les couche B<sub>1</sub> et B<sub>21</sub>(g) du profil G2, et entre les couche A<sub>1</sub> et AB(C) du profil G4.

Quant au drainage, il est bon dans les trois premiers horizons des profils G1, G2, G3 et dans les deux premiers horizons du profil G4, ainsi que dans le premier horizon du profil G5. Il est mauvais dans les derniers horizons des profils G2, G3, G4 et G5.

#### ❑ Appréciation du taux des éléments grossiers

L'appréciation de la dynamique verticale des éléments grossiers, horizon par horizon et par profil, amène à constater une forte accumulation d'éléments grossiers dans les horizons B, intermédiaires (tableau XI et figure 34). L'appréciation des pourcentages cumulés dans les horizons organo-minéraux (A) et les horizons d'accumulation (B) (tableau XII) renseigne sur la dynamique latérale de ces éléments grossiers, depuis le sommet jusqu'au bas de versant (figure 35). L'étude du graphe indique que c'est seulement au niveau du haut de versant que les éléments grossiers ont un taux élevé dans l'horizon organo-minéral, comparé à l'horizon d'accumulation.

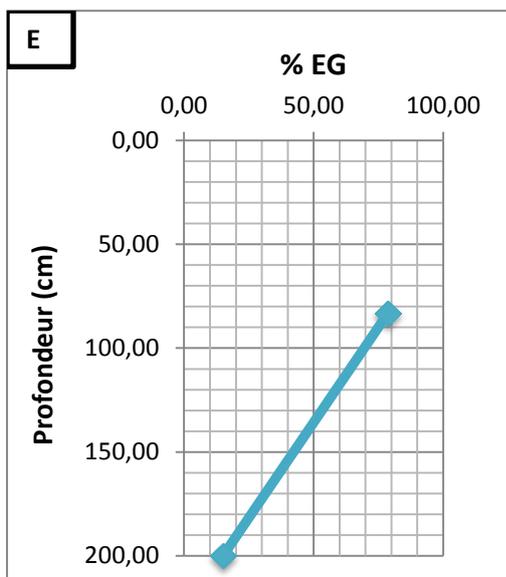
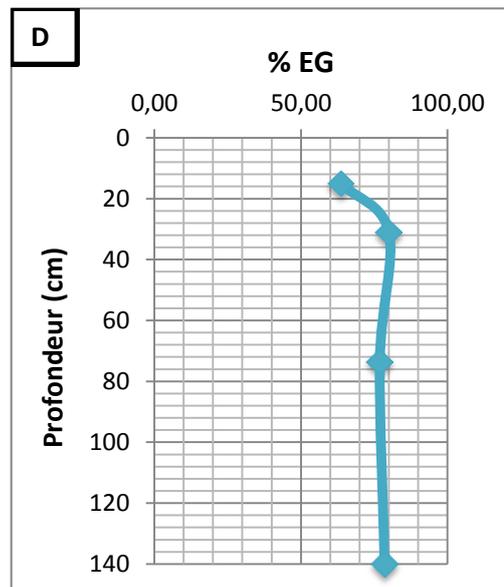
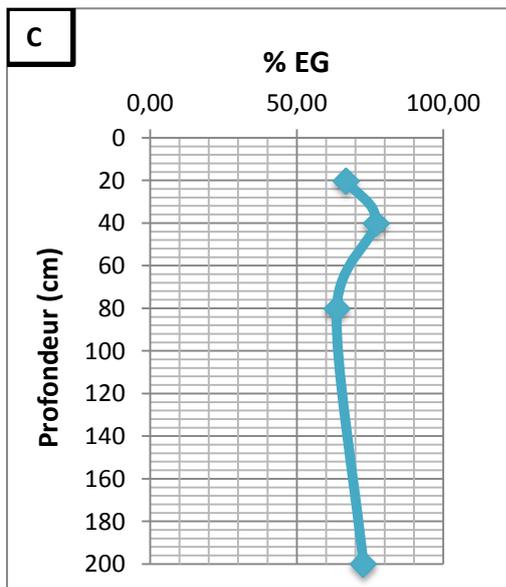
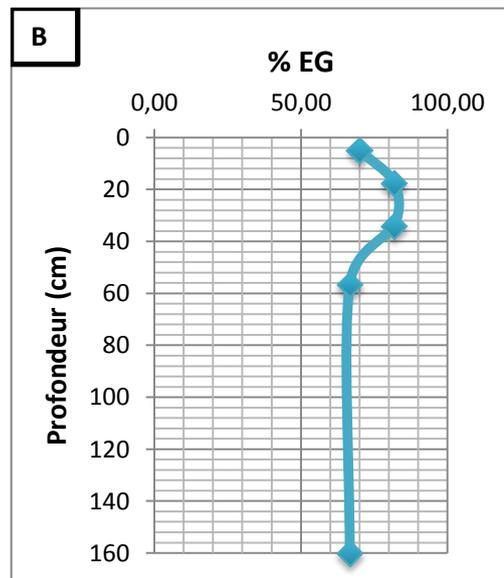
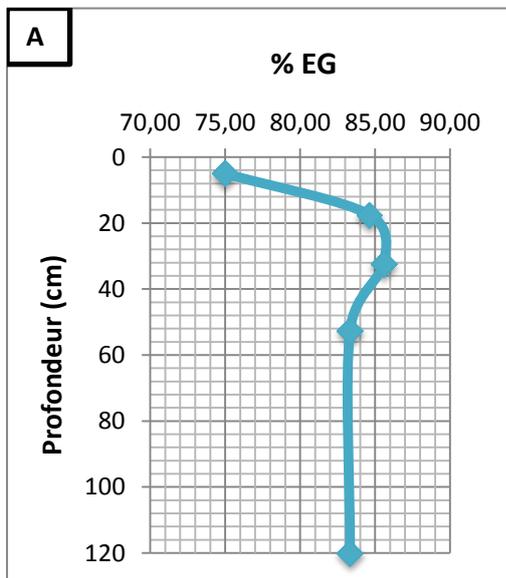


Figure 34 : Dynamique verticale des éléments grossiers dans les sols du Guéto

A : Profil du sommet (G1)    B : Profil du haut versant (G2)    C : Profil du 1/3 supérieur du moyen versant (G3)  
 D : Profil du 1/3 inférieur du moyen versant (G4)    E : Profil du bas versant (G5)

À l'exception du cas du haut versant, les taux d'éléments grossiers sont plus élevés dans les horizons d'accumulation. Ces éléments grossiers sont des concrétions et débris d'altérites, de taille millimétrique à centimétrique.

#### □ **Type de sols décrits au Guéto**

Les sols du Guéto décrits sont tous brunifiés. Les différents sous-groupes se résument en un sol remanié, à faciès rajeuni, au niveau du profil de sommet (G1), un sol rajeuni, remanié au niveau des profils de haut de versant (G2), et du 1/3 supérieur du moyen versant (G3). Par contre, les deux derniers profils (G4 et G5) ont leur faciès rajeuni et induré. La gamme de ces sols, suivant la classification de la Commission de Pédologie et de Cartographie des sols (CPCS) et leur équivalent "World Reference Base" (WRB), est consignée dans le tableau XIII.

#### **5.2.2.2.2. Appréciation des caractères physico-chimiques des sols du Guéto**

Les valeurs du potentiel hydrogène (pH) et du potentiel d'oxydo-réduction (Eh) des échantillons de sol du Guéto étudiés, sont consignées dans le tableau XIV. On observe ainsi, sur ce tableau, la variabilité verticale de ces deux paramètres. Pour une vue latérale de l'évolution du pH et du Eh, depuis le sommet jusqu'au bas de versant, les données du tableau XV ont été calculées, tenant compte des tranches d'horizons organo-minéraux et de profondeur.

Le test de Fischer a également été utilisé pour une appréciation statistique de ces valeurs à travers l'analyse de la variance (ANOVA). Ainsi donc, toutes les valeurs ont montré des différences hautement significatives, à la probabilité  $P < 0,05$ .

#### □ **Degré d'acidité des sols du Guéto**

Les sols du Guéto analysés, ont des valeurs de pH inférieures à 7, comprises entre 4,34 et 5,80. Ces sols sont donc très acides à acides, et, au niveau du profil du sommet, ce sont les horizons B (AB, B<sub>1</sub>(C) et B<sub>2</sub>(C)) qui sont les plus acides, comparés aux horizons organo-minéraux A<sub>11</sub> et A<sub>12</sub>. Les valeurs respectives du pH de ces horizons sont de 4,89 ; 4,34 ; 4,83 pour les horizons d'accumulation et de 5,41 et 5,29 pour les horizons A. C'est le même cas au niveau du profil G4, où les horizons B sont plus acides.

Tableau XII : Éléments grossiers par horizons (Guéto)

Profil	Horizon	Profondeur (cm)	% éléments grossiers
G1	A	0 - 25	79,81
	B	25 - 120	84,08
G2	A	0 - 25	75,91
	B	25 - 160	71,72
G3	A	0 - 20	66,67
	B	20 - 200	71,10
G4	A	0 - 47	71,82
	B	47 - 140	77,75
G5	A	0 - 15	78,57
	B	15 - 200	83,33

Tableau XIII : Sols décrits au Guéto

Profil	Type de classification	
	CPCS (1967)	WRB (2006)
G1	Sol brunifié, remanié à faciès rajeuni	Cambisol pisoplinthique
G2	Sol brunifié, rajeuni, remanié	Cambisol manganiférique
G3	Sol brunifié, rajeuni, remanié	Cambisol manganiférique
G4	Sol brunifié, remanié à faciès rajeuni et induré en profondeur	Cambisol plinthique
G5	Sol brunifié, remanié à faciès rajeuni et induré	Cambisol plinthique

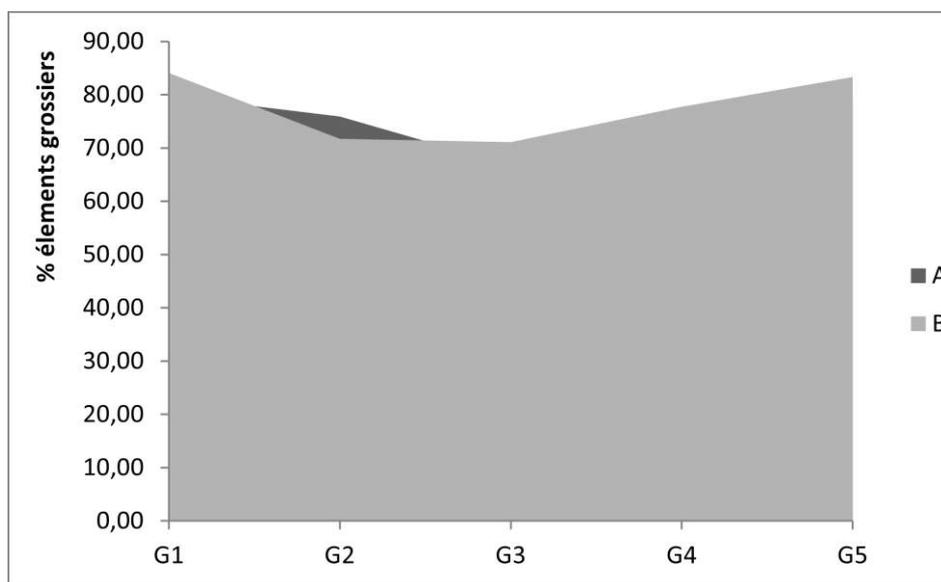


Figure 35 : Dynamique latérale des éléments grossiers le long de la toposéquence au Guéto

Les valeurs du pH des horizons B du profil G4 sont de 4,90 pour l'horizon B<sub>1</sub> et 4,86 pour l'horizon B<sub>2</sub>FeC. Cette dernière valeur est identique à celle de l'horizon A<sub>3</sub>, et implique que dans ce profil, l'acidité est plus prononcée de l'horizon A<sub>3</sub> jusqu'à l'horizon B<sub>2</sub>FeC.

Pour le reste des profils (G2, G3 et G5), l'acidité est plus forte dans les horizons organo-minéraux que dans les horizons d'accumulation. Pour cette tranche, la valeur minimale, au niveau du profil G2 est de 5,15 dans les horizons organo-minéraux, et de 5,64 dans les horizons B. Au niveau du profil G3, la minimale des valeurs du pH se situe entre 4,82 et 5,07, respectivement, dans l'horizon organo-minéral et dans les horizons B. Quant au profil G5, on a la minimale, qui est de 5,48, dans l'horizon A<sub>1</sub>, et de 5,51 dans l'horizon AB(C).

L'évolution latérale du pH montre que du haut de versant au bas de versant, l'acidité est plus marquée dans la tranche 0-20 cm, qui est essentiellement organo-minéral. Par contre, du sommet au haut de versant, le phénomène est inverse (figure 36).

#### **□ Degré d'oxydation et de réduction des sols du Guéto**

Les résultats indiquent un potentiel redox plus élevé dans les horizons B du profil de haut de versant (G1) et du profil du 1/3 inférieur de moyen versant (G4). Ces valeurs varient de l'ordre de 110 à 142 mV. Les horizons organo-minéraux des profils de haut de versant, 1/3 supérieur de moyen versant et de bas versant, sont ceux dont les taux sont les plus élevés.

La couverture latérale, telle que présentée à la figure 37, indique que du haut de versant (G2) au 1/3 inférieur du moyen versant (G4), les horizons organo-minéraux ont des taux plus élevés que ceux de profondeur.

#### **□ Étude comparative de la dynamique verticale entre le pH et le Eh**

L'étude comparative (figure 38) nous indique que lorsque les valeurs du pH augmentent, celles du Eh diminuent et inversement. Tout se passe comme s'il y avait un antagonisme entre les valeurs du pH et du Eh.

Tableau XIV : pH et Eh des horizons des profils du Guéto

Profil	Horizon	Prof. (cm)	pH	Eh
G1	A <sub>11</sub>	0 - 10	5,41 <sup>a</sup>	80,90 <sup>a</sup>
	A <sub>12</sub>	10 - 25	5,29 <sup>b</sup>	85,71 <sup>b</sup>
	AB	25 - 40	4,89 <sup>c</sup>	111,42 <sup>c</sup>
	B <sub>1</sub> (C)	40 - 65	4,34 <sup>d</sup>	142,61 <sup>d</sup>
	B <sub>2</sub> (C)	65 - 120	4,83 <sup>e</sup>	114,11 <sup>e</sup>
G2	A <sub>1</sub>	0 - 10	5,15 <sup>a</sup>	91,91 <sup>a</sup>
	A <sub>3</sub>	10 - 25	5,44 <sup>b</sup>	77,02 <sup>b</sup>
	B <sub>1</sub>	25 - 43	5,64 <sup>c</sup>	66,91 <sup>c</sup>
	B <sub>21</sub> (g)	43 - 70	5,80 <sup>d</sup>	58,80 <sup>d</sup>
	B <sub>22</sub> (g)(C)	70 - 160	5,80 <sup>d</sup>	57,41 <sup>e</sup>
G3	A <sub>1</sub>	0 - 20	4,82 <sup>a</sup>	111,60 <sup>a</sup>
	AB	20 - 60	5,07 <sup>b</sup>	99,11 <sup>b</sup>
	B <sub>1</sub>	60 - 100	5,34 <sup>c</sup>	82,30 <sup>c</sup>
	B <sub>2</sub> (g)(C)	100 - 200	5,67 <sup>d</sup>	63,81 <sup>d</sup>
G4	A <sub>1</sub>	0 - 15	4,95 <sup>a</sup>	104,61 <sup>a</sup>
	A <sub>3</sub>	15 - 47	4,86 <sup>b</sup>	110,62 <sup>b</sup>
	B <sub>1</sub>	47 - 100	4,90 <sup>c</sup>	108,80 <sup>c</sup>
	B <sub>2</sub> FeC	100 - 140	4,86 <sup>b</sup>	110,12 <sup>d</sup>
G5	A <sub>1</sub>	0 - 15	5,48 <sup>a</sup>	74,71 <sup>a</sup>
	AB(C)	15 - 200	5,51 <sup>b</sup>	72,32 <sup>b</sup>

Tableau XV : pH et Eh des horizons de surface et de profondeur du Guéto

Profil	Horizon	Profondeur (cm)	pH	Eh (mV)
G1	Hs	0 - 25	5,35	83,31
	Hp	25 - 120	4,69	122,72
G2	Hs	0 - 25	5,29	84,47
	Hp	25 - 160	5,75	61,04
G3	Hs	0 - 20	4,95	105,36
	Hp	20 - 200	5,51	73,06
G4	Hs	0 - 47	4,91	107,62
	Hp	47 - 140	4,88	109,46
G5	Hs	0 - 15	5,48	74,71
	Hp	15 - 200	5,51	72,32

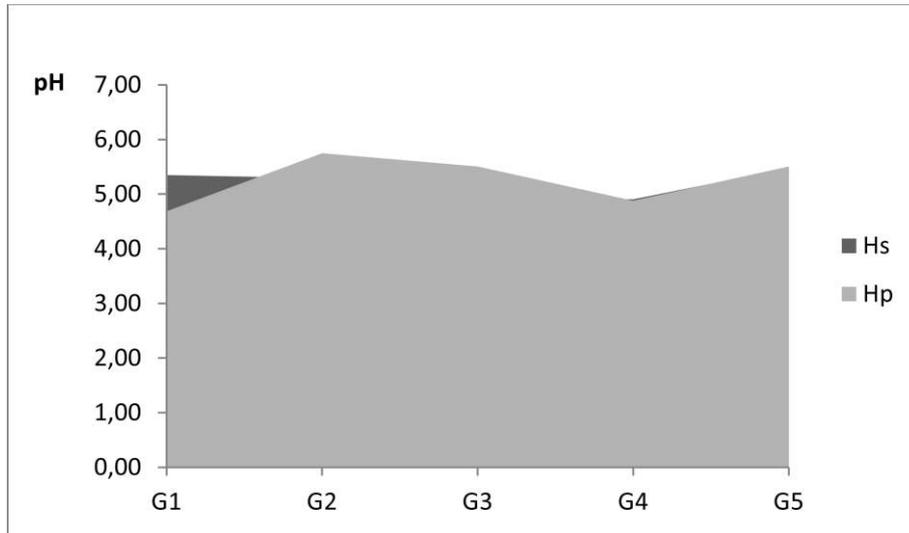


Figure 36 : Dynamique latérale du degré d'acidité des sols le long de la toposéquence au Guéto

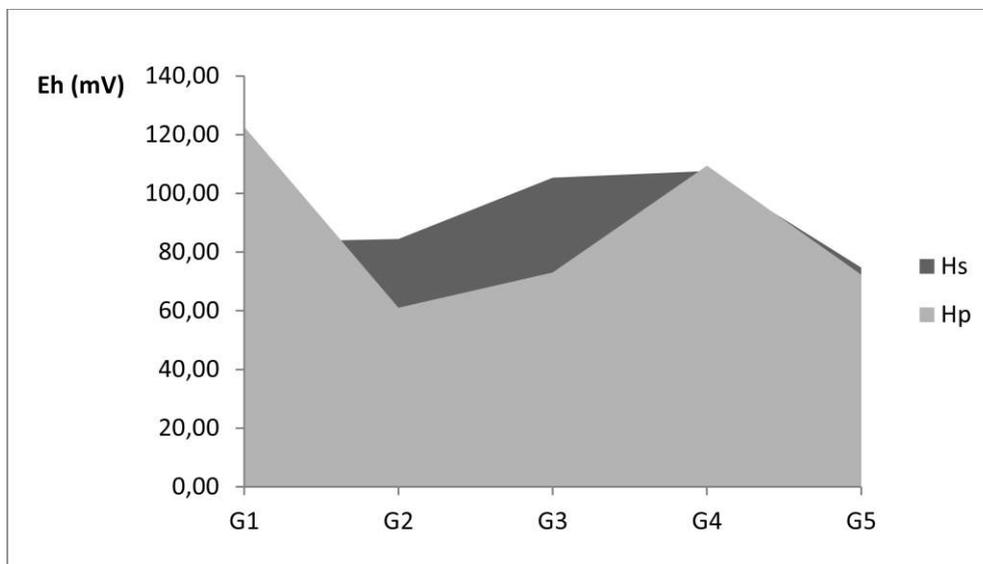


Figure 37 : Dynamique latérale du potentiel redox des sols de la toposéquence au Guéto

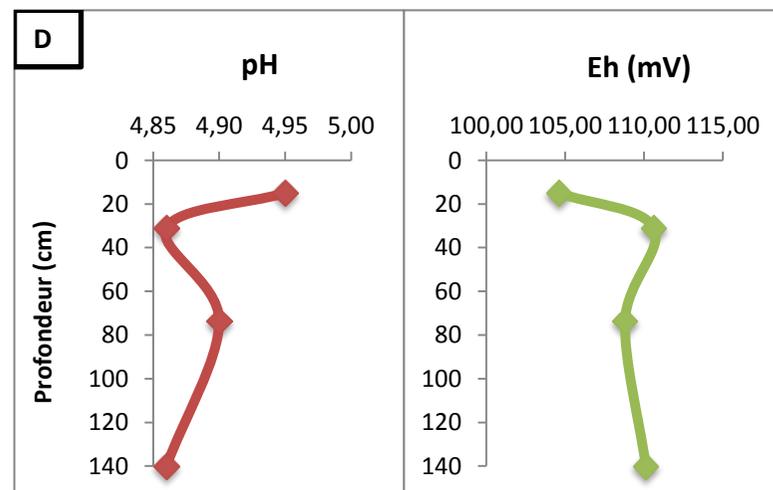
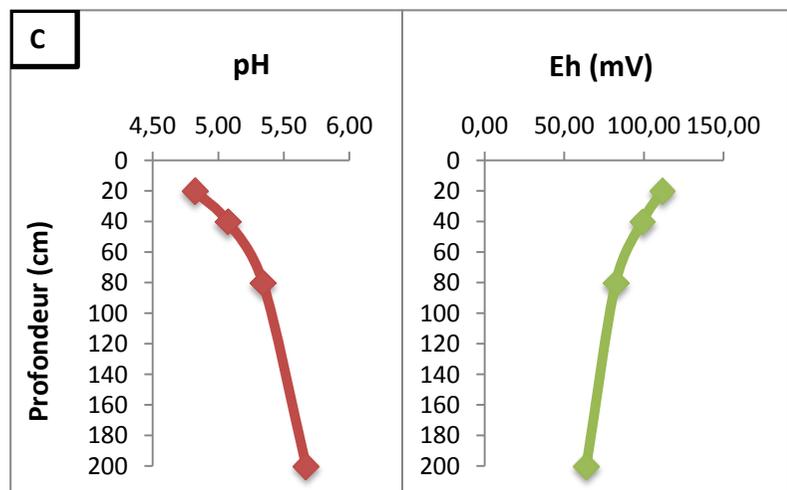
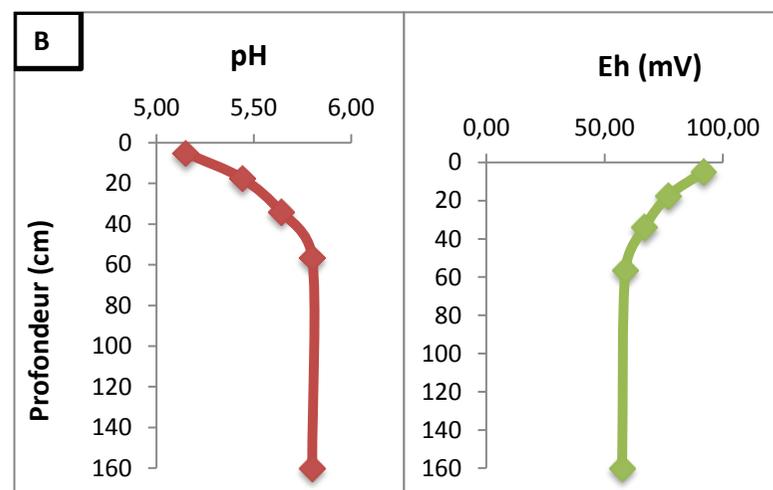
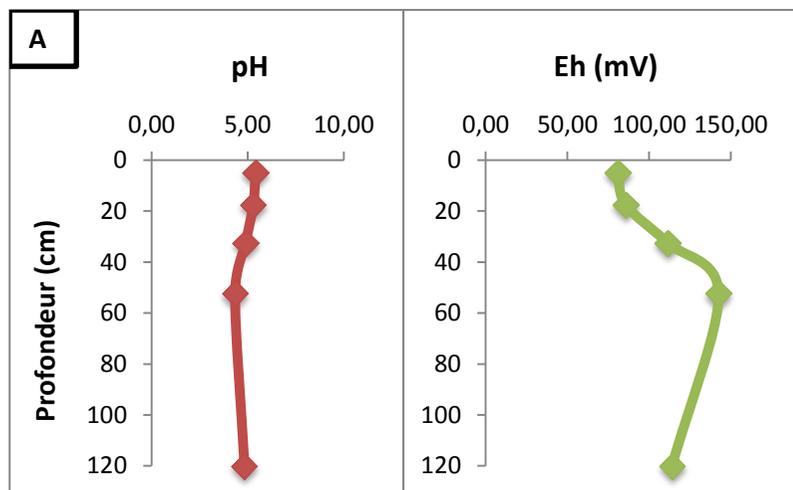


Figure 38 : Comparaison pH/Eh de chaque profil de la toposéquence du Guéto

A : Profil du sommet (G1) B : Profil du haut versant (G2) C : Profil du 1/3 supérieur du moyen versant (G3) D : Profil du 1/3 inférieur du moyen versant (G4) E : Profil du bas versant (G5)

### **5.3. Fond pédogéochimique des sols étudiés**

#### **5.3.1. Données géochimiques de la microanalyse R-X**

Les analyses des échantillons de sols à l'EDS ont permis la détermination semi-quantitative de la composition chimique des sols, l'établissement du bilan des phases présentes ou absentes dans chaque échantillon, et l'appréciation de leur évolution au sein des profils de sol.

##### **5.3.1.1. Composition chimique, indice d'altération et minéralogie des sols du Blafo**

###### **5.3.1.1.1. Composition chimique des sols du Blafo**

Les oxydes majeurs contenus dans les sols du Blafo sont regroupés dans le tableau XVI, et les différents graphes indiquant leurs dynamiques verticales sont présentés sur les figures 39, 40, 41 et 42.

La concentration en  $\text{SiO}_2$  des différents horizons des quatre (4) solums va de 41,20 à 65,46% massique. Les concentrations des profils de sommet (B1) et de haut de versant (B2) sont dans le même ordre, variant de 41 à 50% et, seuls les horizons organo-minéraux (horizons A) sont ceux ayant les taux les plus forts (47 à 50%), comparés aux horizons B, qui ont les plus petites valeurs (41 à 45%). S'agissant des profils de moyen versant (B3) et de bas de versant (B4), les teneurs en  $\text{SiO}_2$  varient de 51,34 à 65,46% ; tout comme les profils B1 et B2, les teneurs sont plus élevées dans les horizons organo-minéraux (horizons A) que dans les horizons d'accumulation (horizons B). Au niveau de l'horizon C du profil B3, la teneur de  $\text{SiO}_2$  est de 64,76%. Les profils de moyen versant (B3) et de bas de versant (B4) ont les plus forts taux, comparés à ceux du sommet (B1) et du haut de versant (B2).

Les teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  varient de 30,75 à 35,17%, au niveau du profil B1, de 24,62 à 32,87%, au niveau du profil B2, et, respectivement, de 24,01 à 30,07% et de 19,17 à 25,10%, au niveau des profils B3 et B4. Ici, seuls les horizons B sont les plus riches en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , comparés aux horizons organo-minéraux (horizons A). Ainsi, les teneurs dans les horizons B des divers profils varient, respectivement, de 34,5 à 35,17% pour le profil B1, de 31,33 à 32,87 pour le B2, de 24,01 à 30,07 pour le B3 et de 23,96 à 25,10 pour le profil B4.

Tableau XVI : Composition en oxydes majeurs des sols du Blafo (en %)

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Concentration en % d'oxydes												
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SrO	MnO	CuO	CaO	MgO	MoO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<b>B1</b>	A <sub>11</sub>	0 - 5	50,18 <sup>a</sup>	30,75 <sup>a</sup>	14,24 <sup>a</sup>	1,13 <sup>a</sup>	-	1,76	-	0,25	-	0,89	0,80 <sup>a</sup>	-	-
	A <sub>12</sub>	5 - 20	47,10 <sup>b</sup>	32,15 <sup>b</sup>	15,80 <sup>ad</sup>	0,91 <sup>b</sup>	0,44	1,68	-	0,19	-	0,45	0,65 <sup>ab</sup>	0,62	-
	B <sub>1</sub> (C) <sub>g</sub>	20 - 39	44,8 <sup>c</sup>	35,17 <sup>c</sup>	16,06 <sup>bd</sup>	0,80 <sup>c</sup>	0,36	1,61	-	0,10	-	-	0,47 <sup>b</sup>	-	0,63
	B <sub>2</sub> (C)	39 - 70	42,84 <sup>d</sup>	34,5 <sup>c</sup>	16,78 <sup>cd</sup>	0,80 <sup>c</sup>	0,44	1,76	1,5	-	-	-	0,49 <sup>cb</sup>	-	0,90
<b>B2</b>	A <sub>1</sub>	0 - 7	49,68 <sup>a</sup>	24,62 <sup>a</sup>	19,57 <sup>a</sup>	1,08	0,47	1,69	1,10	1,09 <sup>a</sup>	-	0,69 <sup>a</sup>	-	-	-
	AB(C)	7 - 20	48,09 <sup>b</sup>	27,53 <sup>b</sup>	19,46 <sup>a</sup>	1,10	-	1,71	0,74	0,88 <sup>a</sup>	-	0,50 <sup>b</sup>	-	-	-
	B <sub>1</sub> (C)	20 - 50	45,98 <sup>c</sup>	31,33 <sup>c</sup>	18,23 <sup>b</sup>	1,02	0,52	1,61	0,76	0,55 <sup>bc</sup>	-	-	-	-	-
	B <sub>2</sub> (C)	50 - 60	42,2 <sup>d</sup>	32,87 <sup>c</sup>	20,50 <sup>ad</sup>	1,02	0,38	1,53	0,96	0,55 <sup>c</sup>	-	-	-	-	-
	C	60 - 100	41,25 <sup>d</sup>	32,54 <sup>c</sup>	21,08 <sup>cd</sup>	1,02	0,51	1,81	1,14	0,49 <sup>dc</sup>	0,17	-	-	-	-
<b>B3</b>	A <sub>11</sub>	0 - 10	56 <sup>a</sup>	27,18 <sup>a</sup>	10,08 <sup>a</sup>	2,12 <sup>a</sup>	1,56 <sup>a</sup>	0,98 <sup>a</sup>	0,96	0,38 <sup>a</sup>	0,39	0,34	-	-	-
	A <sub>12</sub>	10 - 22	53,08 <sup>b</sup>	29,04 <sup>b</sup>	11,85 <sup>bc</sup>	2,3 <sup>b</sup>	1,55 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	0,63	0,53 <sup>a</sup>	-	-	-	-	-
	B <sub>1</sub>	22 - 35	51,34 <sup>c</sup>	30,07 <sup>cb</sup>	12,26 <sup>c</sup>	2,22 <sup>b</sup>	1,76 <sup>b</sup>	0,85 <sup>a</sup>	0,87	0,47 <sup>a</sup>	0,15	-	-	-	-
	B <sub>2</sub> (C)	35 - 55	56,98 <sup>a</sup>	24,01 <sup>d</sup>	13,59 <sup>d</sup>	1,40 <sup>c</sup>	1,09 <sup>c</sup>	0,88 <sup>a</sup>	0,93	0,85 <sup>b</sup>	0,27	-	-	-	-
	B <sub>22</sub> (C)	55 - 70	55,84 <sup>a</sup>	28,76 <sup>eb</sup>	9,28 <sup>a</sup>	2,5 <sup>d</sup>	1,61 <sup>ab</sup>	0,65 <sup>bc</sup>	1,22	-	0,13	-	-	-	-
	C	70 - 120	64,76 <sup>d</sup>	24,04 <sup>fd</sup>	4,99 <sup>e</sup>	2,67 <sup>e</sup>	1,71 <sup>ab</sup>	0,57 <sup>a</sup>	1,13	-	0,11	-	-	-	-
<b>B4</b>	A <sub>11</sub>	0 - 5	65,46 <sup>a</sup>	19,17 <sup>a</sup>	9,32 <sup>a</sup>	1,36	0,88	0,96	1,17	0,68	-	0,59	0,41	-	-
	A <sub>12</sub>	5 - 15	62,77 <sup>b</sup>	21,80 <sup>b</sup>	9,82 <sup>a</sup>	1,48	0,94	1,51	1,17	0,51	-	-	-	-	-
	B <sub>1</sub> (C)	15 - 30	59,55 <sup>c</sup>	24,76 <sup>c</sup>	10,77 <sup>b</sup>	1,49	0,99	0,95	0,97	0,24	0,29	-	-	-	-
	B <sub>2</sub> (C)	30 - 50	57 <sup>d</sup>	25,10 <sup>dc</sup>	12,15 <sup>ce</sup>	1,50	0,98	1,07	0,96	0,97	0,27	-	-	-	-
	B <sub>22</sub> (C)	50 - 70	57,36 <sup>d</sup>	23,96 <sup>e</sup>	13,06 <sup>de</sup>	1,45	0,94	0,94	1,08	1,07	0,15	-	-	-	-

Les lettres a, b, c, d, e matérialisent la différence de significativité entre les moyennes d'un même profil

Au niveau des horizons A, les valeurs sont de 30,75 à 32,15% au B1, 24,62 à 27,53 au B2, 27,18 à 29,04 au B3 et 19,17 à 21,80 au B4. Une comparaison entre les solums indique que c'est dans celui du sommet (B1), suivi de celui du haut de versant (B2), que les plus forts taux sont enregistrés.

La gamme des concentrations de FeO ou du fer total, est de 14,24 à 16,78 pour le profil B1, 18,23 à 21,08 pour le profil B2, 4,99 à 13,59% pour le B3 et 9,32 à 13,06%, pour le profil B4. Les taux les plus élevés concernent les horizons B d'accumulation et, la dynamique verticale indique un accroissement de la teneur en FeO, des horizons A aux horizons B. Les horizons C, proches de la roche mère, ayant les teneurs les plus faibles au niveau du profil B3 et élevées au niveau du profil B2. Ainsi donc, les teneurs de FeO sont de 16,06 à 16,78% dans les horizons B, 14,24 à 15,80% dans les horizons A du profil B1, 18,23 à 20,50%, et 19,46 à 19,57%, respectivement, dans les horizons B et A du profil B2. Dans le profil B3, on va de 9,28 à 13,59% dans les horizons B, contre 10,08 à 11,85% dans les horizons A, et, au niveau du profil B4, les valeurs vont de 10,77 à 13,06% dans les horizons B, et de 9,32 à 9,82%, dans les horizons A.

Pour le  $K_2O$ , les valeurs oscillent entre 0,80 et 2,67%. Les pourcentages sont décroissants dans les deux premiers profils (B1 et B2), des horizons de surface vers les horizons de profondeur. La particularité ici étant les valeurs constantes observées dans les horizons B, avec, respectivement, un taux de 0,80% et de 1,20% dans ceux des profils B1 et B2. En revanche, les valeurs sont du même ordre dans les horizons B des profils B3 et B4, sauf qu'ici, les taux des horizons B sont supérieurs à ceux des horizons A.

S'agissant du  $Na_2O$ , de 0,36 à 1,76%, il n'existe pas dans le premier horizon ( $A_{11}$ ) du profil du sommet (B1), ni dans le deuxième horizon, de type AB(C), du profil de haut de versant B2. Les valeurs semblent constantes, avec de petits écarts, dans les autres horizons, pour chaque profil. Elles sont de 0,36 à 0,44% dans le profil B1, 0,38 à 0,52% dans le profil B2, 1,09 à 1,71% dans le profil B3, et de 0,88 à 0,99% dans le profil B4.

Le  $TiO_2$  a également été déterminé dans les échantillons analysés, avec des teneurs qui vont de 1,61 à 1,76%, au niveau du B1, 1,61 à 1,81%, au niveau, du B2, 0,57 à 1%, au niveau du B3, et 0,94 à 1,51%, au niveau du B4. La tendance est à une teneur plus élevée dans les profils de sommet et de haut de versant, par rapport aux teneurs dans les profils de moyen et bas de versant.

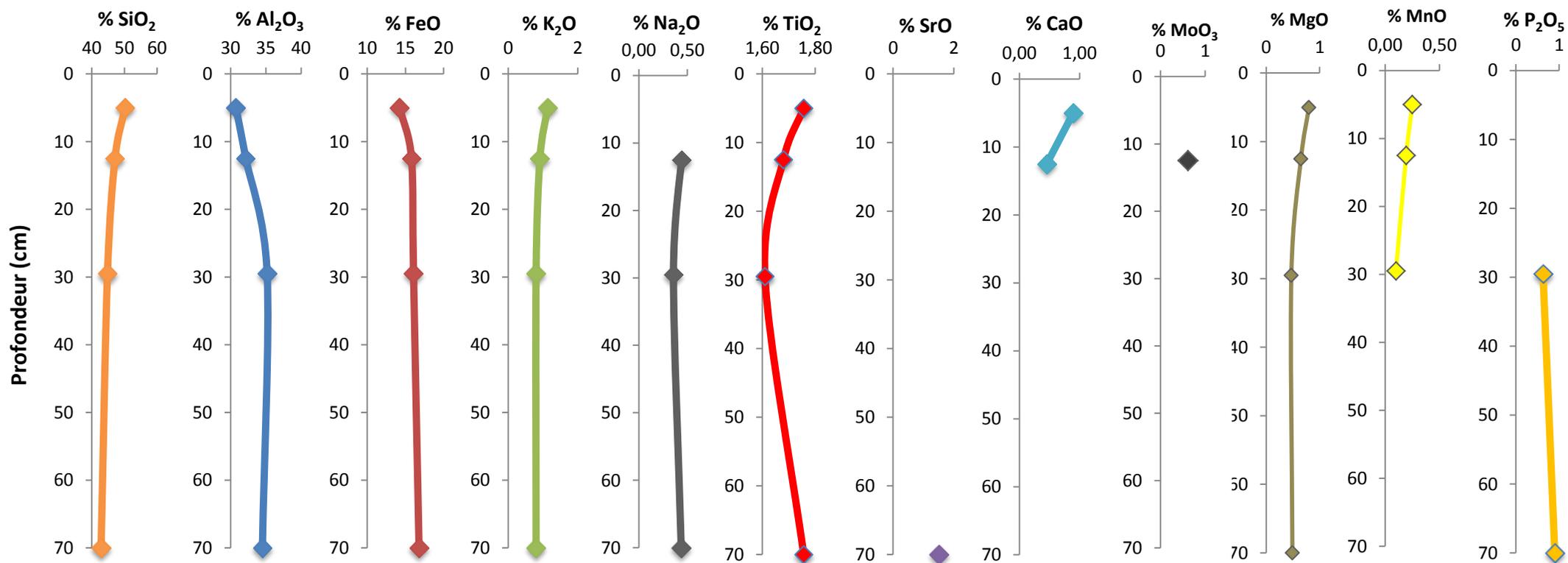


Figure 39 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil B1

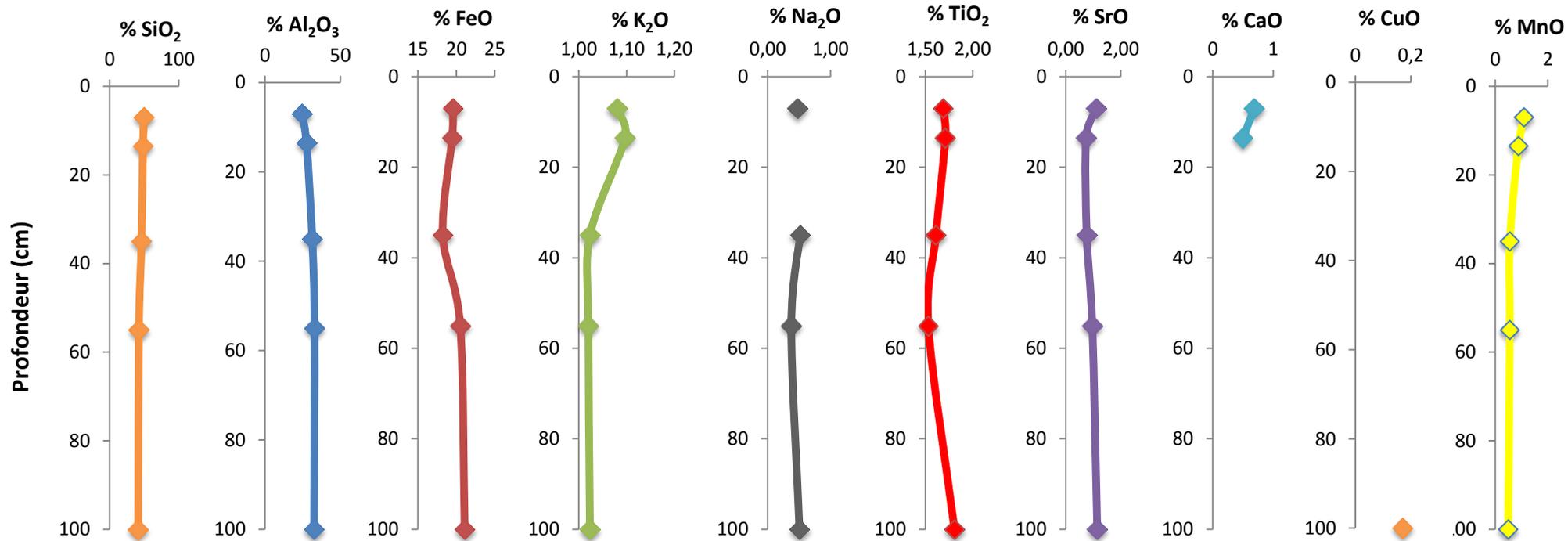


Figure 40 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil B2

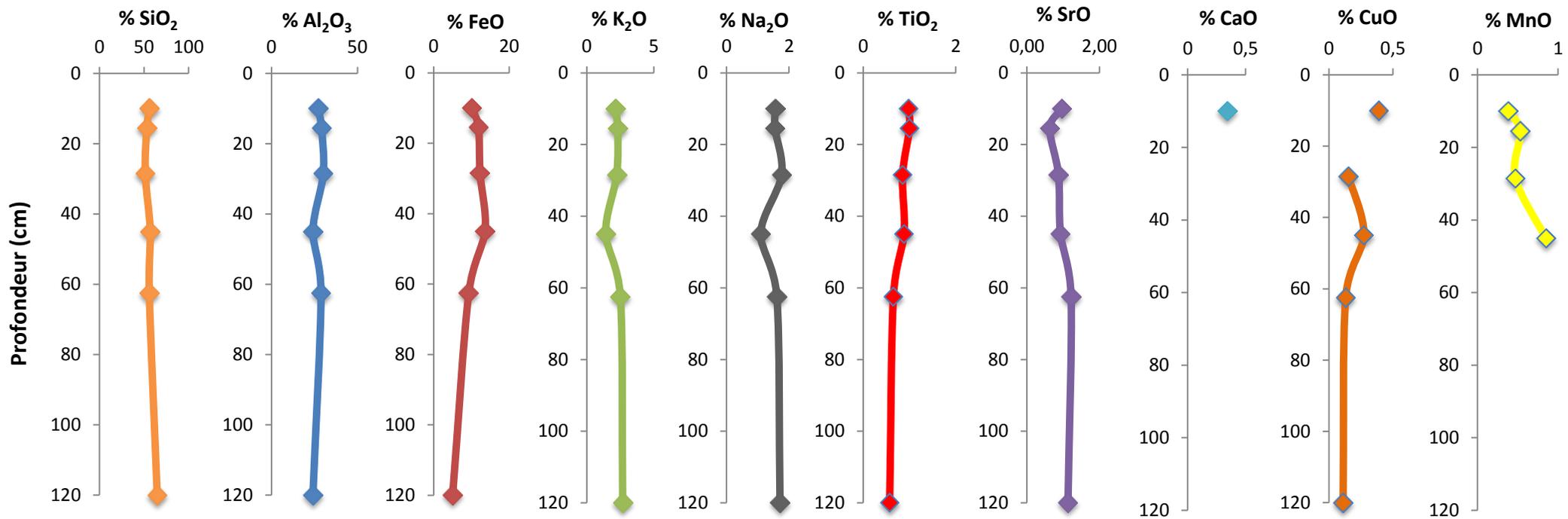


Figure 41 : Dynamique verticale des oxydes dans le profil B3

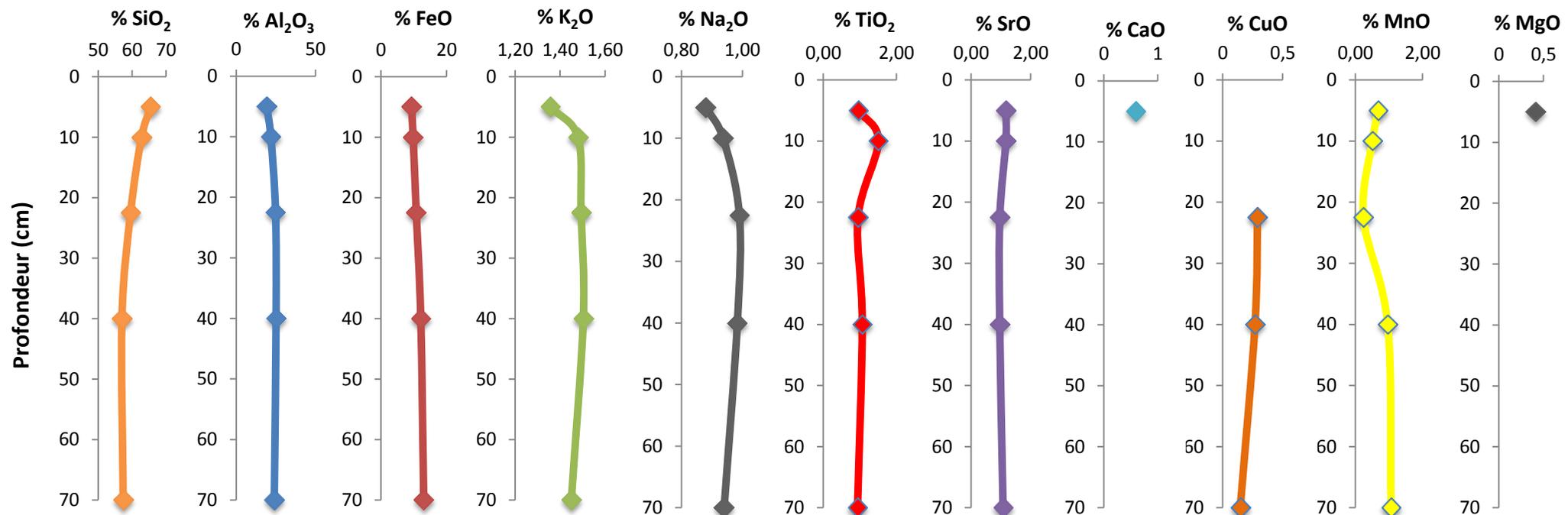


Figure 42 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil B4

Le SrO est présent dans les profils B2, B3, B4 et dans le dernier horizon (B<sub>2</sub>(C)) du profil B1, quoique les horizons B en sont moins riches que les horizons A, et même que les horizons C.

Le MnO a été dosé dans tous les profils, et les teneurs varient de 0,10 à 1,09%. Les horizons de surface (horizons A) semblent plus riches et, dans la couverture latérale, les plus forts taux se situent au haut versant et au bas versant.

Le CuO a été détecté dans les profils de moyen et bas de versant, ainsi que dans le dernier horizon C du haut versant. Les valeurs vont de 0,11 à 0,39%, et leur dynamique est décroissante, de la surface à la profondeur des profils.

CaO, MgO, MoO<sub>3</sub> et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> existent, mais pas dans tous les horizons. CaO, est seulement contenu dans les horizons organo-minéraux, notamment dans les deux premiers horizons des profils B1, B2. Au niveau des profils B3 et B4, on le rencontre dans les premiers horizons. Les teneurs en CaO des horizons concernés varient de 0,34% à 0,89%, et, la tendance est à une diminution des teneurs de l'horizon le plus superficiel à celui qui lui est sous-jacent.

Quant au MgO, il est seulement présent dans tous les horizons du profil de sommet (B1), avec des teneurs décroissantes, de l'horizon superficiel à l'horizon le plus profond. Ces teneurs sont, respectivement, de 0,80% ; 0,65% ; 0,47% et 0,49%. Pour les deux derniers horizons, les valeurs sont sensiblement égales, et ne sont donc pas significativement différentes. MgO a aussi été dosé dans l'horizon superficiel (horizon A<sub>11</sub>) du profil de bas de versant (B1).

MoO<sub>3</sub> et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, existent seulement dans le profil B1, et particulièrement dans l'horizon A<sub>12</sub>, pour le MoO<sub>3</sub>, au taux de 0,62%, et dans les horizons B (B<sub>1</sub>(C)g et B<sub>2</sub>(C)), à des valeurs respectives, de 0,63% et 0,90%.

Les sols du *Blafo*, sont donc pauvres en magnésium, en calcium, en phosphore.

#### **5.3.1.1.2. Indices d'altération des sols du Blafo**

Les valeurs des indices d'altération des sols du Blafo sont indiquées dans les tableaux XVII et XVIII, avec l'appréciation de leur dynamique verticale (figure 43) et latérale (figures 44A et 44B).

On note que l'évolution de l'indice d'altération chimique (CIA), dans l'ensemble des profils, est régulière, de la surface aux horizons de profondeur. Les horizons B sont les plus altérés et, l'indice silice-titane (STI), diminue de la surface à la profondeur. Les différentes valeurs

calculées sont la preuve de l'état d'altération de chaque horizon, marquée par des valeurs de CIA proches de 100, et des valeurs de STI s'éloignant de 90.

Ainsi, au niveau du profil B1, les valeurs du CIA sont de 93,83 à 96,82, de la surface en profondeur, tandis que le STI diminue, passant de 59,88 à 53,87 (figure 43A). Les horizons A<sub>11</sub>, A<sub>12</sub>, B<sub>1</sub>(C) ont des valeurs, respectives, de 93,83 ; 94,69 et 96,82, pour le CIA, contre 59,88 ; 57,64 ; 54,62 pour le STI. Le dernier horizon (B<sub>2</sub>(C)), proche de la roche mère, présente une valeur CIA relativement faible, comparée à l'horizon B<sub>1</sub>(C), indiquant ainsi le caractère moins altéré de cet horizon proche de l'horizon C.

Pour le profil B2 (figure 43B), le CIA va, respectivement, de 91,66 ; 94,52 ; 95,31 ; 95,92 à 95,51 pour les horizons A<sub>1</sub>, AB(C), B<sub>1</sub>(C), B<sub>2</sub>(C) et C, pendant que le STI part de 63,93, 61,18, 57,71, 54,78 et 54,22, pour ces mêmes horizons. La tendance est à une évolution croissante, concernant le CIA, de l'horizon de surface à l'horizon de profondeur du profil, à l'exception de l'horizon C, qui a une valeur légèrement inférieure à celle de l'horizon sus-jacent. En revanche, pour le STI, les valeurs décroissent.

L'examen des données du profil B3 (figure 43C), indique que les valeurs du CIA évoluent, de l'horizon A<sub>11</sub> à l'horizon B<sub>2</sub>(C). Les taux respectifs sont 87,12 ; 88,29 ; 88,31 et 90,60. À partir de l'horizon B<sub>22</sub>(C), les valeurs diminuent, passant de 87,50 à 84,59. Concernant le STI, les valeurs baissent, de l'horizon de surface jusqu'à l'horizon B<sub>1</sub>. À partir, de cet horizon, le STI augmente jusqu'à l'horizon C.

Pour le dernier profil (profil B4), le constat est le même. Ici, comme au niveau des profils B1, B2 et B3, les valeurs du CIA augmentent de la surface à la profondeur, tandis que celles du STI diminuent. Ainsi, le CIA est de 87,15, 90,02, 90,88, 90,99, 90,93, respectivement, pour les horizons A<sub>11</sub>, A<sub>12</sub>, B<sub>1</sub>(C), B<sub>2</sub>(C) et B<sub>22</sub>(C). Pour ces mêmes horizons, les valeurs du STI sont 74,45, 70,60, 68,77, 67,44, 68,64 (figure 43D).

Les sols des sommet et haut versant du Blafo, sont plus altérés que les sols des moyen et bas versant, suivant l'analyse de la dynamique verticale de l'indice d'altération des sols.

Tableau XVII : Indices d'altération CIA et STI des sols du Blafo

Profil	Horizon	Prof. (cm)	CIA	STI	Niveau d'altération
B1	A <sub>11</sub>	0 - 5	93,83	59,88	Très altéré
	A <sub>12</sub>	5 - 20	94,69	57,64	Très altéré
	B <sub>1</sub> (C)g	20 - 39	96,82	54,62	Très altéré
	B <sub>2</sub> (C)	39 - 70	96,54	53,87	Très altéré
B2	A <sub>1</sub>	0 - 7	91,66	63,93	Très altéré
	AB(C)	7 - 20	94,52	61,18	Très altéré
	B <sub>1</sub> (C)	20 - 50	95,31	57,71	Très altéré
	B <sub>2</sub> (C)	50 - 60	95,92	54,78	Très altéré
	C	60 - 100	95,51	54,22	Très altéré
B3	A <sub>11</sub>	0 - 10	87,12	65,73	Très altéré
	A <sub>12</sub>	10 - 22	88,29	63,23	Très altéré
	B <sub>1</sub>	22 - 35	88,31	61,96	Très altéré
	B <sub>2</sub> (C)	35 - 55	90,60	68,59	Très altéré
	B <sub>22</sub> (C)	55 - 70	87,50	65,03	Très altéré
	C	70 - 120	84,59	71,69	Très altéré
B4	A <sub>11</sub>	0 - 5	87,15	74,45	Très altéré
	A <sub>12</sub>	5 - 15	90,02	70,60	Très altéré
	B <sub>1</sub> (C)	15 - 30	90,88	68,77	Très altéré
	B <sub>2</sub> (C)	30 - 50	90,99	67,44	Très altéré
	B <sub>22</sub> (C)	50 - 70	90,93	68,64	Très altéré

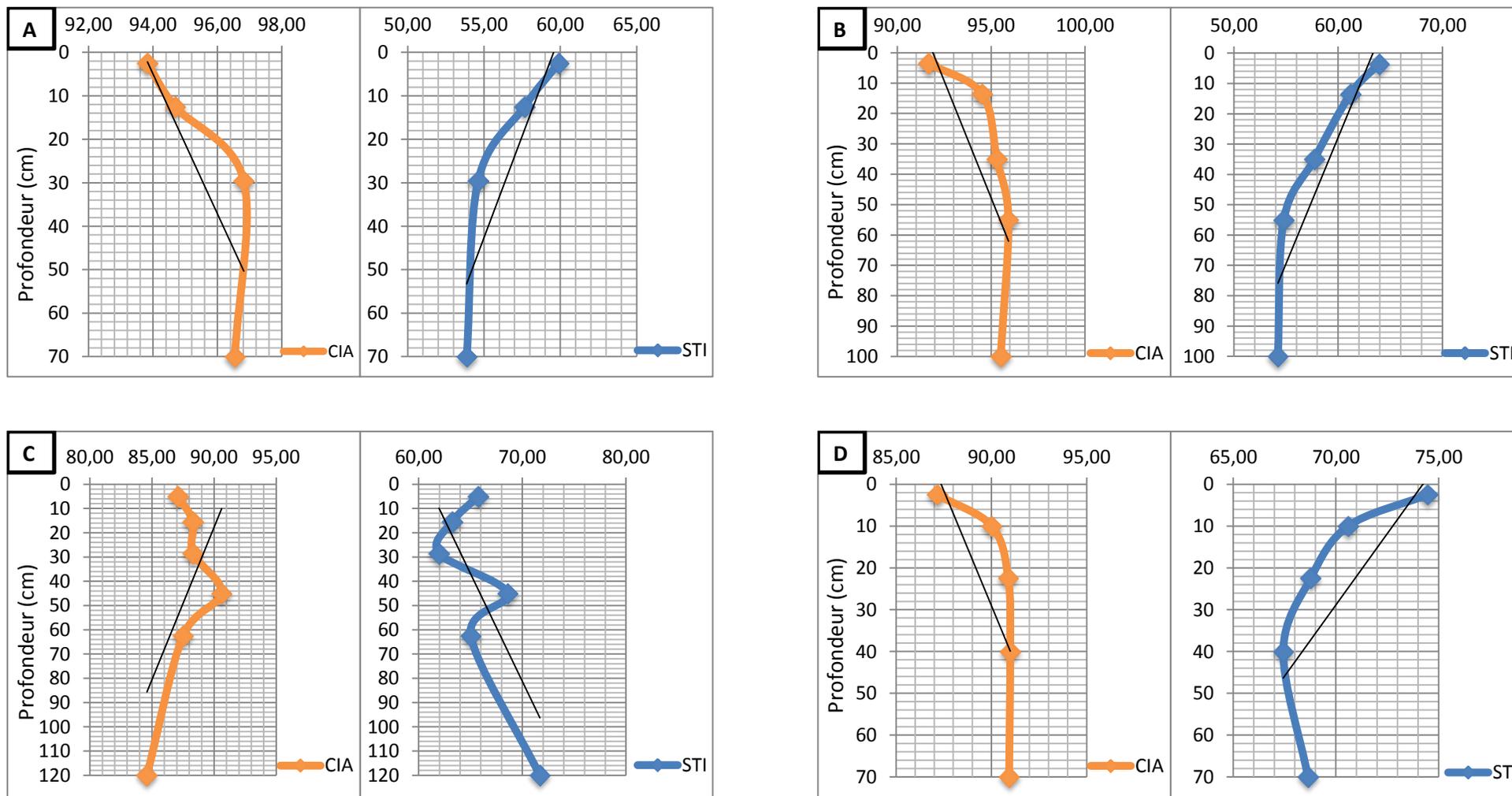


Figure 43 : Indices d'altération CIA et STI des profils du Blafo

A : Profil du sommet (B1) B : Profil du haut versant (B2) C : Profil du moyen versant (B3) D : Profil du bas versant (B4)

Tableau XVIII : Indices d'altération CIA et STI en fonction des tranches d'horizon  
(Blafo)

Profil	Horizon	Profondeur (cm)	CIA	STI
B1	Hs	0 - 20	94,26	58,76
	Hp	20 - 70	96,68	54,24
B2	Hs	0 - 20	93,09	62,55
	Hp	20 - 100	95,58	55,57
B3	Hs	0 - 22	87,70	64,48
	Hp	22 - 120	87,75	66,82
B4	Hs	0 - 15	88,59	72,53
	Hp	15 - 30	90,93	68,28

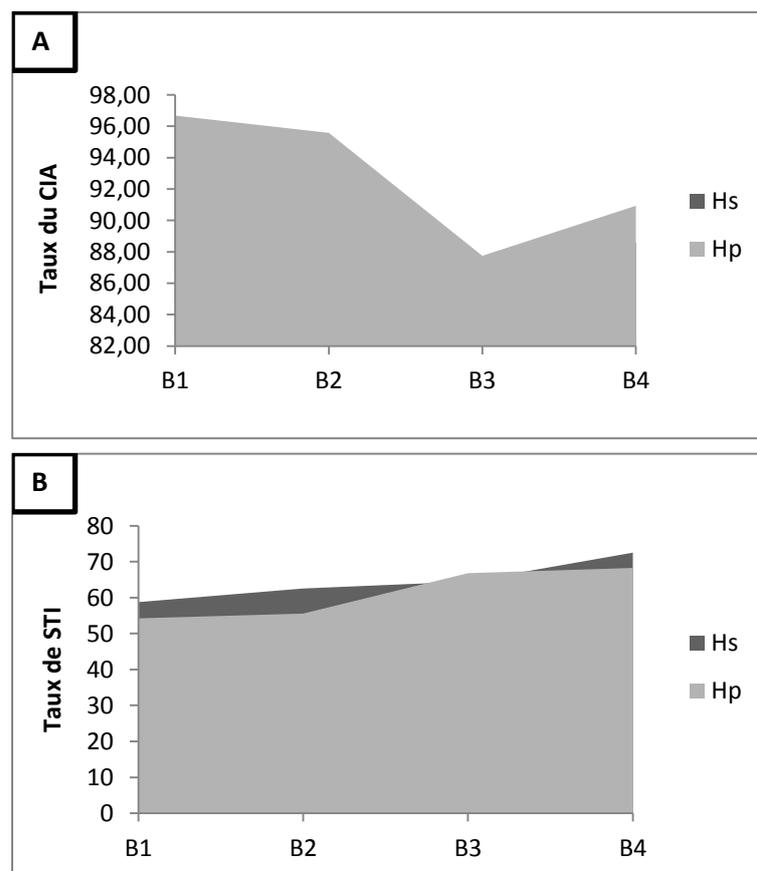


Figure 44 : Dynamique latérale des indices d'altération CIA (A) et STI (B) des sols au Blafo

Ainsi, le tableau XVIII indique que, du sommet au bas de versant, les horizons de profondeur (à partir de 20cm) ont un indice d'altération supérieur à celui des horizons organo-minéraux. De plus, l'altération d'ensemble des horizons est plus poussée, du sommet au bas de versant (figure 44A et 44B).

### **5.3.1.1.3. Appréciation de divers rapports d'oxydes dans les sols du Blafo**

Les différents rapports d'oxydes calculés au niveau des sols du Blafo sont présentés dans le tableau XIX.

L'analyse du rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  indique des valeurs inférieures à 2, avec quelques exceptions allant jusqu'à 3 dans certains horizons. Ainsi, au niveau du profil de sommet (profil B1), tous les taux obtenus sont strictement inférieurs à 2, et, respectivement, de 1,63, 1,47, 1,27 et 1,24 pour les horizons  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $B_1(\text{C})g$  et  $B_2(\text{C})$ . La dynamique verticale indique des valeurs décroissantes, avec un taux faible au niveau des horizons B d'accumulation. En conséquence, du point de vue minéralogique, quant à la nature du type d'argile, on est dans le domaine du mélange de la kaolinite et de la gibbsite. Autrement dit, chaque horizon, au niveau de ce profil est composé du mélange de kaolinite et de gibbsite.

S'agissant du profil de haut versant (profil B2), les taux sont tous strictement inférieurs à 2 dans les quatre derniers horizons, à l'exception de l'horizon  $A_1$  de surface, dont la valeur est légèrement supérieure à 2. Ici, comme dans le profil B1, les horizons sont composés du mélange de kaolinite et de gibbsite et, pour l'horizon  $A_1$ , on considérera qu'il ne contient que la kaolinite. Pour le profil de moyen versant (profil B3), on considérera les horizons  $A_{12}$  et  $B_1$ , comme étant des horizons à mélange de kaolinite et gibbsite, tandis que les horizons  $A_{11}$  et  $B_{22}(\text{C})$  sont à kaolinite seule, et les horizons  $B_2(\text{C})$  et C, à argile de type 2/1 ; les valeurs du rapport étant, respectivement, de 2,37 et 2,69 pour ces horizons. Au niveau du profil de bas de versant (profil B4), les valeurs du rapport pour chaque horizon, sont strictement supérieures à 2, ce qui fait dire que ces horizons sont à argile de type 2/1.

Au niveau du rapport des alcalins, c'est-à-dire, du rapport  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ , toutes les valeurs obtenues, pour l'ensemble des horizons de tous les profils, sont dans la gamme 0 à 0,79. Ces taux indiquent la dominance du  $\text{K}_2\text{O}$  sur le  $\text{Na}_2\text{O}$ , soulignant ainsi une certaine affinité potassique de ces sols. Mais, l'examen du taux de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  par rapport à la somme des alcalins  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ , souligne un caractère non hyperalcalin des sols.

Tableau XIX : Quelques ratios d'oxydes majeurs des sols du Blafo

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Concentration en % d'oxyde					Rapport d'oxydes			
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O/MgO
B1	A <sub>11</sub>	0 - 5	50,18	30,75	1,13	-	0,8	1,63	0,00	1,13	1,41
	A <sub>12</sub>	5 - 20	47,1	32,15	0,91	0,44	0,65	1,47	0,48	1,35	1,40
	B <sub>1</sub> (C)g	20 - 39	44,8	35,17	0,8	0,36	0,47	1,27	0,45	1,16	1,70
	B <sub>2</sub> (C)	39 - 70	42,84	34,5	0,8	0,44	0,49	1,24	0,55	1,24	1,63
B2	A <sub>1</sub>	0 - 7	49,68	24,62	1,08	0,47	-	2,02	0,44	1,55	-
	AB(C)	7 - 20	48,09	27,53	1,10	-	-	1,75	0,00	1,10	-
	B <sub>1</sub> (C)	20 - 50	45,98	31,33	1,02	0,52	-	1,47	0,51	1,54	-
	B <sub>2</sub> (C)	50 - 60	42,2	32,87	1,02	0,38	-	1,28	0,37	1,40	-
	C	60 - 100	41,25	32,54	1,02	0,51	-	1,27	0,50	1,53	-
B3	A <sub>11</sub>	0 - 10	56	27,18	2,12	1,56	-	2,06	0,74	3,68	-
	A <sub>12</sub>	10 - 22	53,08	29,04	2,3	1,55	-	1,83	0,67	3,85	-
	B <sub>1</sub>	22 - 35	51,34	30,07	2,22	1,76	-	1,71	0,79	3,98	-
	B <sub>2</sub> (C)	35 - 55	56,98	24,01	1,4	1,09	-	2,37	0,78	2,49	-
	B <sub>22</sub> (C)	55 - 70	55,84	28,76	2,5	1,61	-	1,94	0,64	4,11	-
	C	70 - 120	64,76	24,04	2,67	1,71	-	2,69	0,64	4,38	-
B4	A <sub>11</sub>	0 - 5	65,46	19,17	1,36	0,88	0,41	3,41	0,65	2,24	3,31
	A <sub>12</sub>	5 - 15	62,77	21,8	1,48	0,94	-	2,88	0,63	2,42	-
	B <sub>1</sub> (C)	15 - 30	59,55	24,76	1,49	0,99	-	2,41	0,66	2,48	-
	B <sub>2</sub> (C)	30 - 50	57	25,1	1,50	0,98	-	2,27	0,65	2,49	-
	B <sub>22</sub> (C)	50 - 70	57,36	23,96	1,45	0,94	-	2,39	0,65	2,39	-

En effet, toutes les valeurs de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sont largement supérieures aux valeurs de la somme des alcalins ; il s'agit donc de sols alumineux.

Le rapport  $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$  indique des valeurs allant de 1,40 à 1,70 dans le profil B1, où le  $\text{MgO}$  a été identifié. Ces rapports, très bas, et inférieurs à 2,5, indiquent l'état de pauvreté de ces sols en  $\text{K}_2\text{O}$ .

### **5.3.1.2. Composition chimique, indice d'altération et minéralogie des sols du Guéto**

#### **5.3.1.2.1. Composition chimique des sols du Guéto**

Les résultats du contenu en oxydes majeurs des sols du Guéto sont présentés dans le tableau XX, et illustrés par les figures 45 à 49.

Au niveau du  $\text{SiO}_2$ , et pour l'ensemble des profils analysés, les concentrations varient de 42,85 à 63,80%, avec les plus forts taux au tiers inférieur du moyen versant, et au bas de versant. Sur ces profils, les concentrations les plus fortes concernent les horizons organo-minéraux (horizons A), avec des teneurs variant de 55,49 à 63,80%, au niveau du profil G4, et 55,30, au niveau du G5. S'agissant des profils de sommet (G1), de haut de versant (G2), les teneurs en  $\text{SiO}_2$  varient de 42,85 à 46,41% et, tout comme les profils G4 et G5, les teneurs sont plus élevées dans les horizons organo-minéraux (horizons A) que dans les horizons d'accumulation (horizons B). Une exception est à signaler au niveau du profil du tiers supérieur du moyen versant (G3), où le phénomène est inversé. À ce niveau, les horizons B sont les plus riches en  $\text{SiO}_2$ , avec des teneurs de l'ordre de 46%, contre 44% en surface.

Les teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  des divers profils sont de 34,27 à 37,71%, au niveau du profil G1, de 35,19 à 38,21%, au niveau du profil G2, et, respectivement, de 34,61 à 36,87%, de 21,36 à 29,42% et de 16,58 à 20,45%, au niveau des profils G3, G4 et G5. Pour ces profils, seuls les horizons B sont les plus riches en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , comparés aux horizons organo-minéraux (horizons A).

Ainsi, les teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans les horizons B des divers profils varient, respectivement, de 36,47 à 37,71%, pour le profil G1, de 37 à 38,21, pour le G2, de 35,41 à 36,87, pour le G3 et de 23,56 à 29,42, pour le profil G4 et, de 20,45 au profil G5. Au niveau des horizons A, les valeurs sont de 34,27 à 38,13% au profil G1, 35,19 à 36,30 au profil G2, 34,61 à 35,62% au profil G3, 21,36 à 27,05 au profil G4 et 20,45 au profil G5.

Tableau XX : Composition en oxydes majeurs des sols du Guéto

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Concentration en % d'oxydes											
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SrO	MnO	CuO	CaO	MgO	MoO <sub>3</sub>
G1	A <sub>11</sub>	0 - 10	45,19 <sup>a</sup>	34,27 <sup>a</sup>	11,95 <sup>b</sup>	2,36	1,22	1,36	2,33 <sup>a</sup>	-	0,44	0,88	-	-
	A <sub>12</sub>	10 - 25	44,82 <sup>ad</sup>	35,13 <sup>b</sup>	13,06 <sup>ba</sup>	2,35	1,08	1,32	1,69 <sup>bcd</sup>	-	-	0,56	-	-
	AB	25 - 40	44,10 <sup>bd</sup>	36,47 <sup>c</sup>	13,31 <sup>a</sup>	2,38	1,10	1,33	1,17 <sup>cde</sup>	-	0,13	-	-	-
	B <sub>1</sub> (C)	40 - 65	42,85 <sup>ce</sup>	37,36 <sup>d</sup>	13,98 <sup>a</sup>	2,28	1,01	1,34	1,18 <sup>de</sup>	-	-	-	-	-
	B <sub>2</sub> (C)	65 - 120	43,33 <sup>be</sup>	37,71 <sup>d</sup>	13,13 <sup>a</sup>	2,42	1,09	1,19	1,13 <sup>e</sup>	-	-	-	-	-
G2	A <sub>1</sub>	0 - 10	47,07 <sup>a</sup>	35,19 <sup>a</sup>	10,27 <sup>a</sup>	2,59 <sup>a</sup>	1,48 <sup>a</sup>	1,47 <sup>a</sup>	1,41	-	-	0,52 <sup>a</sup>	-	-
	A <sub>3</sub>	10 - 25	45,14 <sup>bc</sup>	36,30 <sup>b</sup>	11,95 <sup>b</sup>	2,55 <sup>ad</sup>	1,53 <sup>a</sup>	1,20 <sup>bd</sup>	1,14	-	-	0,18 <sup>b</sup>	-	-
	B <sub>1</sub>	25 - 43	45,02 <sup>bc</sup>	37 <sup>c</sup>	11,63 <sup>b</sup>	2,39 <sup>bd</sup>	1,34 <sup>a</sup>	1,23 <sup>cd</sup>	1,39	-	-	-	-	-
	B <sub>21</sub> (g)	43 - 70	46,2 <sup>de</sup>	38,21 <sup>d</sup>	8,61 <sup>c</sup>	2,74 <sup>a</sup>	1,53 <sup>a</sup>	1,41 <sup>a</sup>	1,30	-	-	-	-	-
	B <sub>22</sub> (g)(C)	70 - 160	45,72 <sup>be</sup>	38,21 <sup>d</sup>	8,74 <sup>c</sup>	3,08 <sup>c</sup>	1,96 <sup>b</sup>	1,38 <sup>a</sup>	0,89	-	-	-	-	-
G3	A <sub>1</sub>	0 - 20	44,19	34,61 <sup>a</sup>	11,73	4,38 <sup>a</sup>	1,35 <sup>a</sup>	1,43	1,17	0,56	0,35	0,22	-	-
	AB	20 - 60	45,61	35,62 <sup>a</sup>	11,26	3,79 <sup>b</sup>	1,15 <sup>b</sup>	1,23	1,10	0,24	-	-	-	-
	B <sub>1</sub>	60 - 100	46,11	36,87 <sup>b</sup>	8,10	4,93 <sup>c</sup>	1,25 <sup>ab</sup>	1,53	1,21	-	-	-	-	-
	B <sub>2</sub> (g)(C)	100 - 200	46,41	35,41 <sup>a</sup>	8,41	5,80 <sup>d</sup>	1,45 <sup>a</sup>	1,33	1,19	-	-	-	-	-
G4	A <sub>1</sub>	0 - 15	63,80 <sup>a</sup>	21,36 <sup>a</sup>	8,17 <sup>a</sup>	1,85	0,73 <sup>a</sup>	1,18 <sup>a</sup>	1,70 <sup>a</sup>	0,52 <sup>a</sup>	0,46	0,23	-	-
	A <sub>3</sub>	15 - 47	55,49 <sup>b</sup>	27,05 <sup>b</sup>	11,73 <sup>b</sup>	1,82	0,78 <sup>a</sup>	1,25 <sup>a</sup>	1,36 <sup>a</sup>	0,53 <sup>a</sup>	-	-	-	-
	B <sub>1</sub>	47 - 100	53,46 <sup>c</sup>	29,42 <sup>c</sup>	11,92 <sup>b</sup>	1,80	0,85 <sup>a</sup>	1,02 <sup>ac</sup>	1,28 <sup>ab</sup>	0,25 <sup>a</sup>	-	-	-	-
	B <sub>2</sub> FeC	100 - 140	47,74 <sup>d</sup>	23,56 <sup>d</sup>	19,48 <sup>c</sup>	2,16	1,06 <sup>b</sup>	0,88 <sup>bc</sup>	0,8 <sup>b</sup>	4,11 <sup>b</sup>	0,13	0,07	-	-
G5	A <sub>1</sub>	0 - 15	55,30	21,99 <sup>a</sup>	16,58	1,59 <sup>a</sup>	0,49	1,32	-	1,22	-	0,3	0,52	0,7
	AB(C)	15 - 200	48,90	25,19 <sup>b</sup>	20,45	1,33 <sup>b</sup>	0,60	1,14	1,00	1,39	-	-	-	-

Les lettres a, b, c, d, e matérialisent la différence de significativité entre les moyennes d'un même profil

Une comparaison entre les solums indique que les profils de sommet (G1), haut de versant (G2) et tiers supérieur du moyen versant (G3) ont des taux similaires, et, ce sont ceux dont les concentrations sont les plus fortes, comparés au profil G4 et G5.

Le FeO varie de 11,95 à 13,98%, au niveau du profil G1, de 8,61 à 11,95%, au profil G2, de 8,41 à 11,73%, au profil G3, de 8,17 à 19,48%, au profil G4 et de 16,58 à 20,45, au profil G5. Les horizons d'accumulation des profils G1, G4 et G5 sont les plus riches en FeO, comparés aux horizons organo-minéraux.

En revanche, c'est le contraire au niveau des profils G2 et G5, où ce sont les horizons A qui sont plus riches que les horizons B. La dynamique verticale indique une augmentation de la teneur en FeO, des horizons A vers les horizons B, à l'exception de ceux des profils G2 et G3. Au niveau de ces deux profils (G2 et G3), ces horizons B sont pseudogleyiques, avec des caractéristiques de l'horizon C, proche de la roche mère.

Les valeurs de  $K_2O$  sont autour de 1,33 à 5,80% pour l'ensemble des profils. Les valeurs des profils, pris individuellement, semblent être du même ordre. Ainsi, pour le profil de sommet (G1), elles oscillent entre 2,28 et 2,42%, pour celui de haut de versant (G2), elles varient de 2,39 à 3,08%, tandis qu'aux profils G3, G4 et G5, les valeurs sont, respectivement, de 3,79 à 5,80%, 1,80 à 2,16%, et 1,33 à 1,59%. On constate aussi, que les profils situés en amont (G1, G2, G3) ont des teneurs plus fortes que ceux situés en aval (G4 et G5).

Concernant  $Na_2O$ , les valeurs sont de l'ordre de 0,49 à 1,96% dans tous les profils. Les profils G1, G2 et G3 ont les teneurs les plus élevées, comparées aux teneurs des profils G4 et G5. En effet, les teneurs varient de 1,01 à 1,22%, 1,34 à 1,96%, 1,15 à 1,45%, 0,73 à 1,06%, et 0,49 à 0,60%, respectivement, pour les profils G1, G2, G3, G4 et G5. Les valeurs semblent constantes, avec de petits écarts dans les horizons, au niveau chaque profil.

Les valeurs détectées du  $TiO_2$  varient, de 0,88 à 1,53% dans l'ensemble des profils. Elles sont toutes du même ordre dans les horizons distinctifs, au niveau de chaque profil, avec de légers écarts : les teneurs des horizons organo-minéraux sont faiblement supérieures à celles des horizons d'accumulation.

Le SrO est présent dans tous horizons analysés, excepté, l'horizon organo-minéral (horizon A<sub>1</sub>) du profil G5.

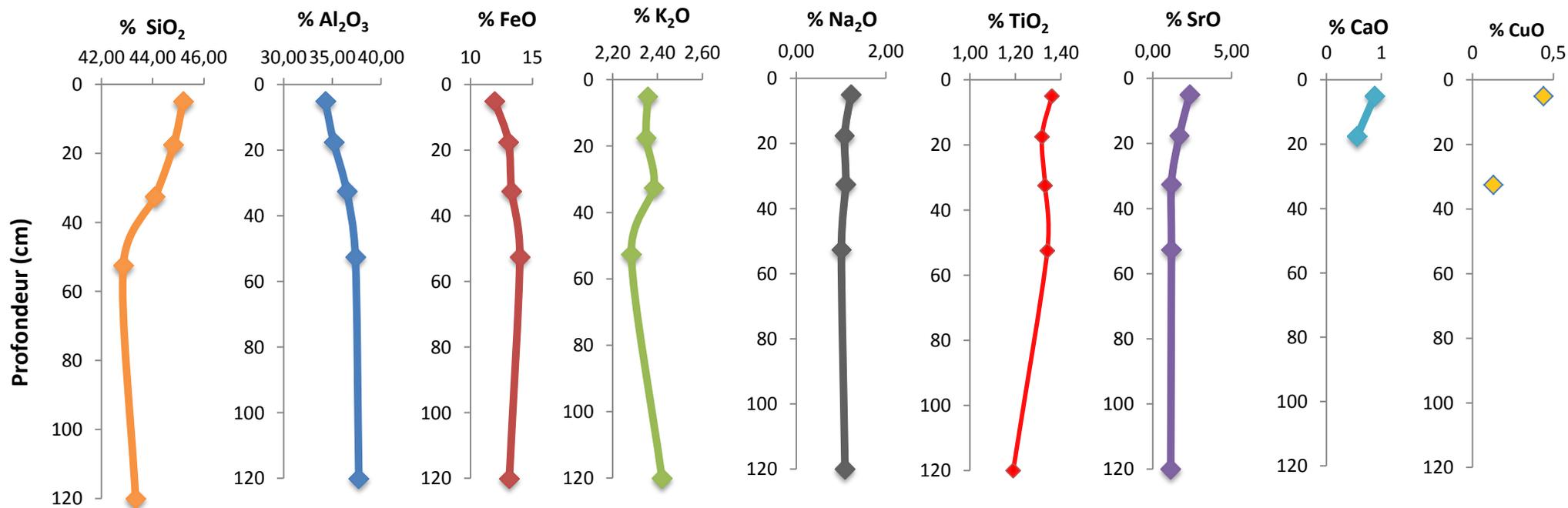


Figure 45 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil G1

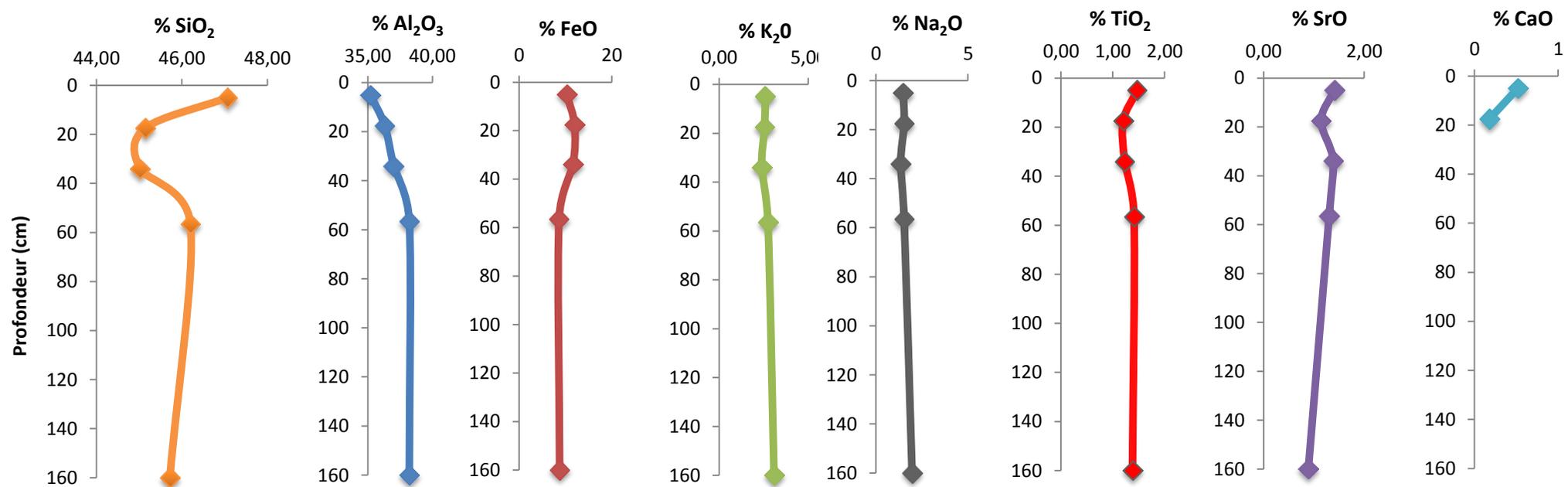


Figure 46 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil G2

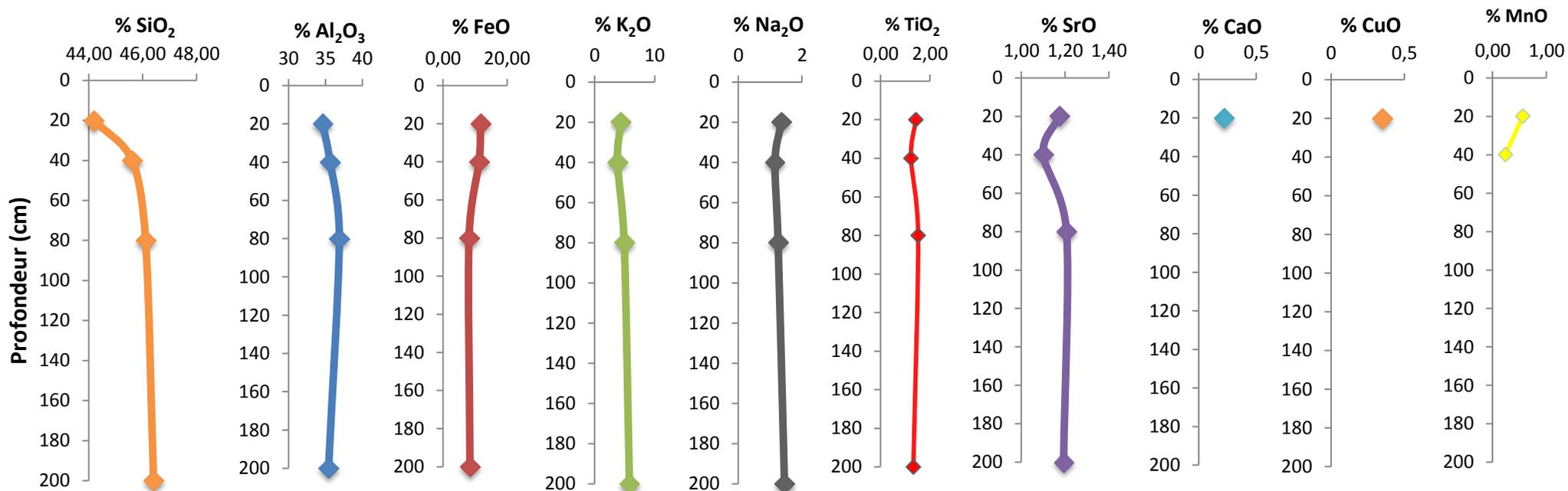


Figure 47 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil G3

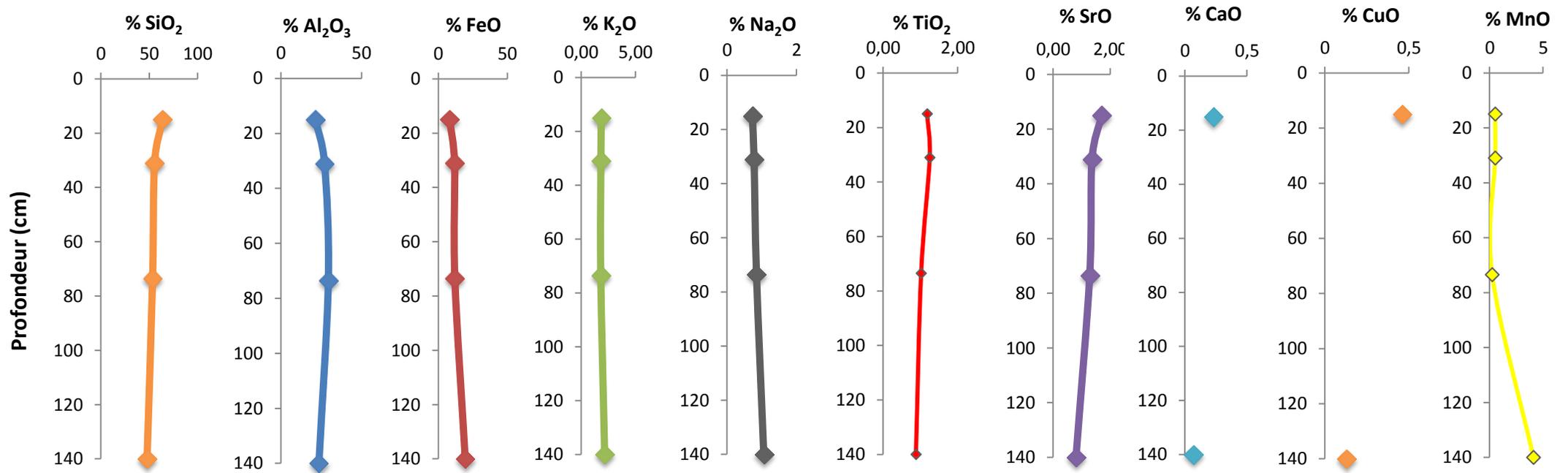


Figure 48 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil G4

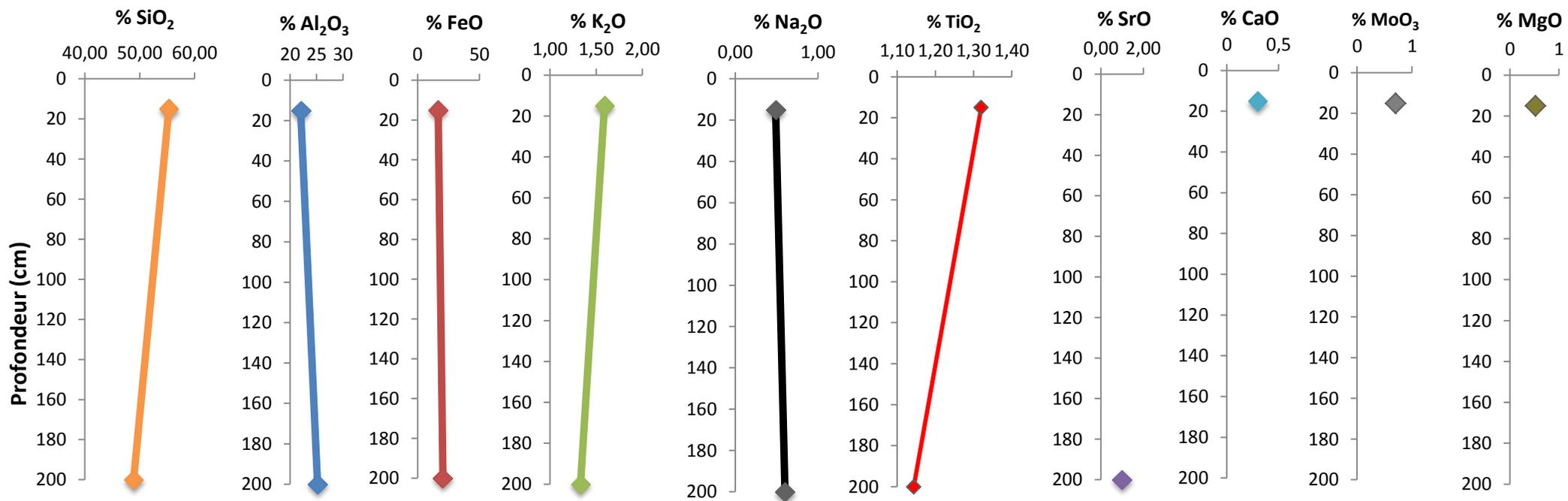


Figure 49 : Dynamique verticale des oxydes majeurs dans le profil G5

Les valeurs semblent les mêmes dans tous les profils, tournant autour de 1 à 2,30%, avec un léger enrichissement du premier horizon de chaque profil, par rapport aux autres horizons.

Le MnO, quant à lui, est, seulement détecté dans les 3 derniers profils que sont G3, G4 et G5. Au niveau du G3, MnO est contenu dans les horizons organo-minéraux (A<sub>1</sub> et AB), à des taux de 0,56 et 0,24%, tandis que dans les profils G4 et G5, il est contenu dans tous les horizons. Ainsi, dans le profil G4, c'est le dernier horizon, plus ou moins induré, qui a la forte teneur (4,11%). C'est le même cas, pour le dernier horizon du profil G5, plus ou moins induré, qui a également une forte teneur (1,39%).

CuO, CaO, MgO et MoO<sub>3</sub> ont été déterminés, mais pas dans tous les profils. Les horizons concernés sont indiqués dans le tableau XX.

#### **5.3.1.2.2. Indice d'altération des sols du Guéto**

Les tableaux XXI et XXII présentent les différents indices d'altération des sols du Guéto. La figure 50 représente les évolutions verticales du CIA et STI, tandis que la figure 51 dégage la dynamique latérale, du sommet au bas de versant.

Dans l'ensemble des profils, l'évolution du CIA est régulière, de la surface aux horizons de profondeur. Les horizons B sont les plus altérés et, pour le STI, les valeurs diminuent de la surface vers les horizons de profondeur. Les différentes valeurs indicatives sont la preuve de l'état d'altération de chaque horizon, avec des valeurs de CIA proche de 100, et des valeurs de STI s'éloignant de 90.

Au niveau du profil de sommet (profil G1), les valeurs du CIA sont, respectivement, pour les horizons A<sub>11</sub>, A<sub>12</sub>, AB, B<sub>1</sub>(C) et B<sub>2</sub>(C), 88,49, 89,80, 91,27, 91,91 et 91,49. Pour ces mêmes horizons, les valeurs du STI sont de 55,62, 54,91, 53,66, 52,42 et 52,58. Le dernier horizon (B<sub>2</sub>(C)), proche de la roche mère, indique une valeur CIA, relativement faible, comparée à l'horizon B<sub>1</sub>(C). À ce niveau, le constat est le même (figure 50A) : le taux CIA est élevé dans les horizons B, tendant vers 100, tandis que le STI diminue tournant autour de 50.

Concernant le profil du haut de versant (profil G2) (figure 50B), le CIA des horizons A<sub>1</sub>, A<sub>3</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>21</sub>(g) et B<sub>22</sub>(g)(C) est, respectivement, de 88,46, 89,50, 90,84, 89,95, 88,35, tandis que le STI part de 55,89, 54,43, 53,91, 53,65 à 53,42, pour ces mêmes horizons. La tendance est

Tableau XXI : Indices d'altération CIA et STI des sols du Guéto

Profil	Horizon	Prof. (cm)	CIA	STI	Niveau d'altération
G1	A <sub>11</sub>	0 - 10	88,49	55,62	Très altéré
	A <sub>12</sub>	10 - 25	89,80	54,91	Très altéré
	AB	25 - 40	91,27	53,66	Très altéré
	B <sub>1</sub> (C)	40 - 65	91,91	52,42	Très altéré
	B <sub>2</sub> (C)	65 - 120	91,49	52,58	Très altéré
G2	A <sub>1</sub>	0 - 10	88,46	55,89	Très altéré
	A <sub>3</sub>	10 - 25	89,50	54,43	Très altéré
	B <sub>1</sub>	25 - 43	90,84	53,91	Très altéré
	B <sub>21</sub> (g)	43 - 70	89,95	53,65	Très altéré
	B <sub>22</sub> (g)(C)	70 - 160	88,35	53,42	Très altéré
G3	A <sub>1</sub>	0 - 20	85,33	54,80	Très altéré
	AB	20 - 60	87,82	55,08	Très altéré
	B <sub>1</sub>	60 - 100	85,64	54,32	Très altéré
	B <sub>2</sub> (g)(C)	100 - 200	83,01	55,53	Très altéré
G4	A <sub>1</sub>	0 - 15	88,37	71,94	Très altéré
	A <sub>3</sub>	15 - 47	91,24	65,20	Très altéré
	B <sub>1</sub>	47 - 100	91,73	63,09	Très altéré
	B <sub>2</sub> FeC	100 - 140	87,74	65,32	Très altéré
G5	A <sub>1</sub>	0 - 15	90,25	68,60	Très altéré
	AB(C)	15 - 200	92,88	64,08	Très altéré

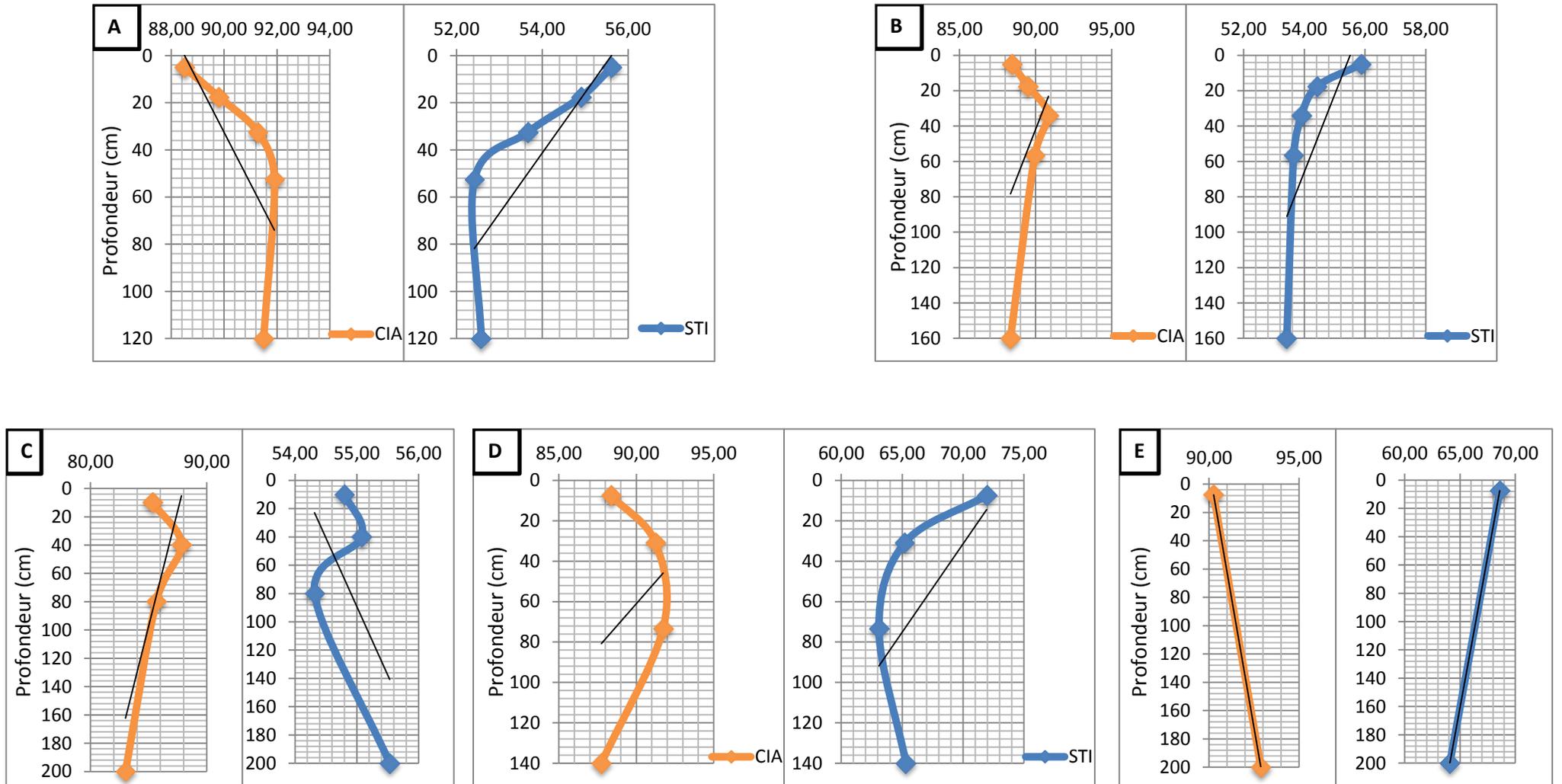


Figure 50 : Indices d'altération CIA et STI des profils du Guéto

A : Profil du sommet (G1) B : Profil du haut versant (G2) C : Profil du 1/3 supérieur du moyen versant (G3) D : Profil du 1/3 inférieur du moyen versant (G4) E : Profil du bas versant (G5)

à une augmentation du CIA, de l'horizon de surface, A<sub>1</sub>, à l'horizon B<sub>1</sub> dans le profil, et à une diminution, au niveau des horizons B<sub>21</sub>(g) et B<sub>22</sub>(g)(C), ayant les caractères de l'horizon C. En revanche, pour le STI, les valeurs décroissent.

Pour le profil G3 (figure 50C), les valeurs du CIA des horizons A<sub>1</sub>, AB, B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub>(g)(C) sont, respectivement, de 85,33, 87,82, 85,64 et 83,01. Les horizons AB et B<sub>1</sub> ont les fort taux pour le CIA. L'horizon B<sub>2</sub>(g)(C), proche de l'horizon C, a un CIA dont la valeur chute à 83,01. Concernant le STI, les valeurs diminuent de l'horizon de surface jusqu'à l'horizon B<sub>1</sub>. À partir, de cet horizon, le STI augmente. Cette situation, normale, témoigne du faible degré d'altération de l'horizon proche de la roche mère.

Pour le profil G4 (figure 50D), les horizons A<sub>3</sub> et B<sub>1</sub> sont les plus altérés, avec des taux respectifs, de CIA de 91,24 et 91,73. Ils ont aussi les plus faibles taux de STI dans le profil. Cette situation est donc normale.

Pour le profil situé en bas de versant (profil G5), le constat est le même, comparé aux profils G1, G2, G3 et G4. Les valeurs du CIA croissent des horizons de surface à ceux de profondeur, tandis que celles du STI décroissent. Ainsi, le CIA est de 90,25 et 92,88, respectivement, pour les horizons A<sub>1</sub>, AB(C). Pour ces mêmes horizons, les valeurs du STI sont de 68,60 et 64,08 (figure 50E).

La dynamique latérale (figures 51A et 51B) indique que, du sommet au bas de versant, les horizons de profondeur (à partir de 20cm) ont un indice d'altération supérieur à celui des horizons organo-minéraux. De plus, l'altération d'ensemble des horizons est plus poussée, du sommet, au haut de versant et au bas de versant. Quant à la dynamique verticale de l'indice d'altération des sols du Blafo, on peut souligner le fait que les sols du sommet, du 1/3 inférieur du moyen versant et du bas de versant, ont leurs horizons plus altérés que les sols du haut de versant et du 1/3 supérieur du moyen de versant.

### **5.3.1.2.3. Examen de rapports d'oxydes divers dans les sols du Guéto**

Le tableau XXIII présente les rapports d'oxydes calculés au niveau des sols du Guéto. L'analyse du rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, indique des valeurs inférieures à 2, avec, néanmoins, quelques valeurs dépassant 2.

Tableau XXII : Indices d'altération CIA et STI par tranche d'horizon

Profil	Horizon	Profondeur (cm)	CIA	STI
G1	Hs	0 - 25	89,15	55,26
	Hp	25 - 120	91,56	52,89
G2	Hs	0 - 25	88,98	55,16
	Hp	25 - 160	89,71	53,66
G3	Hs	0 - 20	85,33	54,80
	Hp	20 - 200	85,49	54,98
G4	Hs	0 - 47	89,81	68,57
	Hp	47 - 140	89,73	64,21
G5	Hs	0 - 15	90,25	68,60
	Hp	15 - 200	92,88	64,08

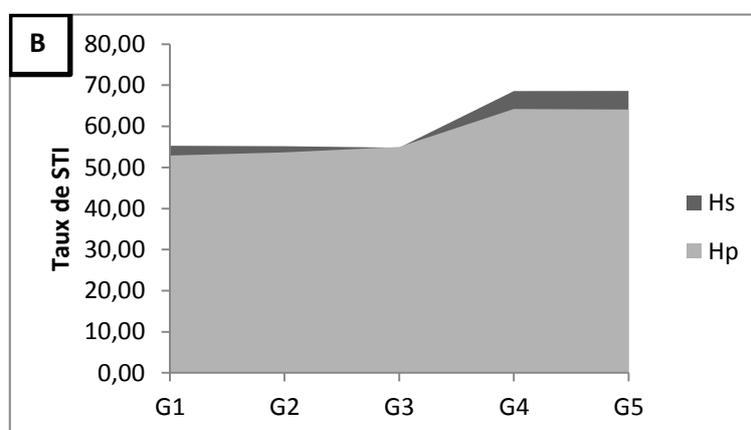
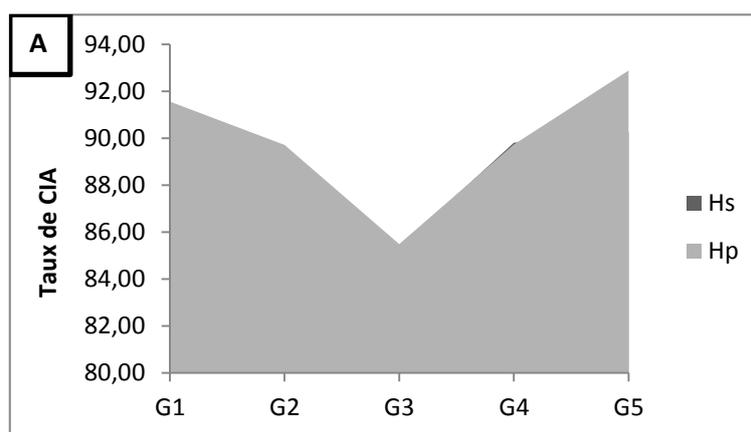


Figure 51 : Dynamique latérale des indices d'altération CIA (A) et STI (B) des sols au Guéto

Tableau XXIII : Quelques ratios d'oxydes majeurs dans les sols du Guéto

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Concentration en % d'oxyde					Rapport d'oxydes			
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O/MgO
G1	A <sub>11</sub>	0 - 10	45,19	34,27	2,36	1,22	-	1,32	0,52	3,58	-
	A <sub>12</sub>	10 - 25	44,82	35,13	2,35	1,08	-	1,28	0,46	3,43	-
	AB	25 - 40	44,10	36,47	2,38	1,10	-	1,21	0,46	3,49	-
	B <sub>1</sub> (C)	40 - 65	42,85	37,36	2,28	1,01	-	1,15	0,44	3,29	-
	B <sub>2</sub> (C)	65 - 120	43,33	37,71	2,42	1,09	-	1,15	0,45	3,51	-
G2	A <sub>1</sub>	0 - 10	47,07	35,19	2,59	1,48	-	1,34	0,57	4,07	-
	A <sub>3</sub>	10 - 25	45,14	36,30	2,55	1,53	-	1,24	0,60	4,08	-
	B <sub>1</sub>	25 - 43	45,02	37,00	2,39	1,34	-	1,22	0,56	3,73	-
	B <sub>21</sub> (g)	43 - 70	46,20	38,21	2,74	1,53	-	1,21	0,56	4,27	-
	B <sub>22</sub> (g)(C)	70 - 160	45,72	38,21	3,08	1,96	-	1,20	0,64	5,04	-
G3	A <sub>1</sub>	0 - 20	44,19	34,61	4,38	1,35	-	1,28	0,31	5,73	-
	AB	20 - 60	45,61	35,62	3,79	1,15	-	1,28	0,30	4,94	--
	B <sub>1</sub>	60 - 100	46,11	36,87	4,93	1,25	-	1,25	0,25	6,18	-
	B <sub>2</sub> (g)(C)	100 - 200	46,41	35,41	5,8	1,45	-	1,31	0,25	7,25	-
G4	A <sub>1</sub>	0 - 15	63,8	21,36	1,85	0,73	-	2,99	0,39	2,58	-
	A <sub>3</sub>	15 - 47	55,49	27,05	1,82	0,78	-	2,05	0,43	2,60	-
	B <sub>1</sub>	47 - 100	53,46	29,42	1,80	0,85	-	1,82	0,47	2,65	-
	B <sub>2</sub> FeC	100 - 140	47,74	23,56	2,16	1,06	-	2,03	0,49	3,22	-
G5	A <sub>1</sub>	0 - 15	55,30	21,99	1,59	0,49	0,52	2,51	0,31	2,08	3,06
	AB(C)	15 - 200	48,90	25,19	1,33	0,60	-	1,94	0,45	1,93	-

C'est ainsi qu'au niveau du profil de sommet (profil G1), les valeurs respectives des horizons A<sub>11</sub>, A<sub>12</sub>, AB, B<sub>1</sub>(C) et B<sub>2</sub>(C) sont 1,32, 1,28, 1,21, 1,15 et 1,15. La dynamique verticale indique des valeurs décroissantes, avec un faible taux au niveau des horizons B d'accumulation. Du point de vue minéralogique, s'agissant du type d'argile, on est dans un domaine de mélange de kaolinite et de gibbsite, et, ce mélange s'observe au niveau de chaque horizon du profil.

S'agissant du profil de haut versant (profil G2), les valeurs du rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont tous, strictement, inférieures à 2 dans tous les horizons. Ici, comme dans le profil G1, les horizons sont composés de mélange de kaolinite et de gibbsite. Les valeurs respectives des horizons A<sub>1</sub>, A<sub>3</sub>, B<sub>1</sub>(C), B<sub>21</sub>(g) et B<sub>21</sub>(g)(C) sont 1,34, 1,24, 1,22, 1,21 et 1,20. Pour le profil du 1/3 supérieur du moyen versant (profil G3), tous les horizons, à l'image de ceux des profils G1 et G2, sont constitués de mélange de kaolinite et de gibbsite. Ici, les valeurs du rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> des horizons A<sub>1</sub>, AB, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>(g)(C) sont, respectivement, de 1,28, 1,28, 1,25, 1,31 et inférieures à 2.

Par contre, pour les profils G4 et G5, tous les horizons ne sont pas constitués du mélange de kaolinite et de gibbsite. En effet, certains horizons ont leur rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> strictement supérieur à 2. Ainsi, les horizons A<sub>1</sub>, A<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>FeC, du profil G4, A<sub>1</sub>, du profil de bas de versant (profil G5), sont constitués d'argiles de type 2/1. Seulement, l'horizon B1 du profil G4 est composé du mélange de kaolinite et gibbsite, pendant que l'horizon AB(C) du profil G5 essentiellement est constitué de kaolinite.

Concernant le rapport des alcalins, c'est-à-dire, le rapport de Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O, toutes les valeurs obtenues, dans l'ensemble des horizons de chacun des profils, sont comprises entre 0,25 et 0,64. De telles valeurs indiquent la dominance du K<sub>2</sub>O sur le Na<sub>2</sub>O, soulignant une certaine affinité potassique de ces sols. Mais, l'examen de la teneur de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par rapport à celle de la somme des alcalins Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O, souligne un caractère non hyperalcalin des sols. En effet, toutes les valeurs de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont largement supérieures aux valeurs de la somme des alcalins ; ce qui fait dire qu'il s'agit donc, de sols alumineux.

Le rapport K<sub>2</sub>O/MgO, dans l'horizon de surface (horizon A<sub>1</sub>) du profil G5, où il est égal à 3,06 et supérieur à 2,5, montre l'état de pauvreté des sols en MgO.

## 5.3.2. Teneur des ETM étudiés dans les sols par analyse spectrométrique

### 5.3.2.1. Teneur en ETM des sols du Blafo

#### 5.3.2.1.1. Dynamique verticale des ETM étudiés

Les valeurs moyennes indiquant la concentration en chaque élément trace métallique (ETM) étudié, par tranche d'horizons et par profil dans les sols du Blafo sont présentées dans le tableau XXIV. Toutes les valeurs de ce tableau, à l'exception de la teneur en cuivre (Cu), expriment une différence significative au seuil de  $\alpha = 0,05$ .

L'appréciation de la dynamique verticale des ETM permet de souligner que, dans le cas du profil de sommet (profil B1) (figure 52), les éléments Cd, Cr, Mn, Pb, Sr et Zn ont des teneurs qui diminuent, de l'horizon de surface aux horizons de profondeur. Cette dynamique décroissante, de la surface aux horizons de profondeur, est systématique pour le Cr, le Pb et le Zn. Au niveau de ces trois éléments, les horizons organo-minéraux ( $A_{11}$  et  $A_{12}$ ) en contiennent plus que les horizons  $B_1(C)g$  et  $B_2(C)$  d'accumulation. Mais, pour le Mn, le Cd et le Sr, la dynamique décroissante semble être ralentie par l'augmentation des concentrations au niveau de certains horizons. Ainsi, concernant le Cd, la concentration augmente de l'horizon  $B_1(C)g$  à l'horizon  $B_2(C)$ , passant de  $0,20 \text{ mg.kg}^{-1}$  à  $0,62 \text{ mg.kg}^{-1}$ , quoique n'atteignant pas les valeurs  $1,34 \text{ mg.kg}^{-1}$  et  $1,01 \text{ mg.kg}^{-1}$  des horizons  $A_{11}$  et  $A_{12}$ . Au niveau du Mn, c'est seulement de l'horizon  $A_{12}$  à l'horizon  $B_1(C)g$  que la concentration augmente, puis elle chute en allant à l'horizon  $B_2(C)$ . Cependant, les trois premiers horizons  $A_{11}$ ,  $A_{12}$  et  $B_1(C)g$  sont les plus concentrés. Le Sr, connaît la même situation que le Cd : la teneur en Sr augmente de l'horizon  $B_1(C)g$  à l'horizon  $B_2(C)$ , passant de  $67,00 \text{ mg.kg}^{-1}$  à  $67,35 \text{ mg.kg}^{-1}$ , mais n'atteint pas les valeurs  $95,66 \text{ mg.kg}^{-1}$  et  $83,32 \text{ mg.kg}^{-1}$  des horizons  $A_{11}$  et  $A_{12}$ . S'agissant des autres éléments (Cu, Fe, Mo, Ni, Ti) dosés, ils semblent ne pas respecter une dynamique précise. Les fortes valeurs de Cu concernent les horizons  $A_{12}$  et  $B_2(C)$ , où elles sont, respectivement, de  $118,96 \text{ mg.kg}^{-1}$  et de  $93,27 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Les plus faibles valeurs se rencontrent dans les horizons  $A_{11}$  et  $B_1(C)g$ , et sont, respectivement, de  $80,90 \text{ mg.kg}^{-1}$  et  $74,79 \text{ mg.kg}^{-1}$ . À l'analyse, on pourrait dire que les plus grandes concentrations du Cu s'observent dans les horizons organo-minéraux  $A_{11}$  et  $A_{12}$ . Pour le Fe, la tendance est à une forte concentration dans les trois premiers horizons, que sont les horizons  $A_{11}$ ,  $A_{12}$  et  $B_1(C)g$ , et, les teneurs de Fe sont en étroite corrélation avec celles de Mn. Les concentrations de Mo, Ni et Ti sont plus fortes dans les horizons  $A_{11}$ ,  $B_1(C)g$  et  $B_2(C)$ . Pour ces trois éléments, la tendance générale est à un plus fort enrichissement des horizons d'accumulation, comparés aux horizons organo-minéraux.

Tableau XXIV : Teneur totale des ETM dosés dans les sols issus du Blafo

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Concentration en mg.kg <sup>-1</sup>												
			As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn
<b>B1</b>	A <sub>11</sub>	0 - 5	<ld	1,34 <sup>a</sup>	24,42 <sup>a</sup>	80,90	49456,97 <sup>a</sup>	<ld	11166,65 <sup>a</sup>	12,79 <sup>a</sup>	30,90 <sup>a</sup>	29,30 <sup>a</sup>	95,66 <sup>a</sup>	3379,49 <sup>a</sup>	76,08 <sup>a</sup>
	A <sub>12</sub>	5 - 20	<ld	1,01 <sup>b</sup>	18,67 <sup>ad</sup>	118,96	42706,35 <sup>b</sup>	<ld	10543,21 <sup>b</sup>	11,31 <sup>a</sup>	20,89 <sup>b</sup>	21,73 <sup>b</sup>	83,32 <sup>b</sup>	1907,48 <sup>b</sup>	77,71 <sup>a</sup>
	B <sub>1</sub> (C) <sub>g</sub>	20 - 39	<ld	0,20 <sup>c</sup>	16,56 <sup>bd</sup>	74,79	51793,00 <sup>a</sup>	<ld	10879,19 <sup>c</sup>	16,10 <sup>b</sup>	23,20 <sup>cb</sup>	16,90 <sup>c</sup>	67,00 <sup>c</sup>	3847,66 <sup>c</sup>	74,72 <sup>a</sup>
	B <sub>2</sub> (C)	39 - 70	<ld	0,62 <sup>d</sup>	13,85 <sup>cd</sup>	93,27	37062,47 <sup>c</sup>	<ld	7176,55 <sup>d</sup>	13,73 <sup>ab</sup>	25,92 <sup>d</sup>	11,33 <sup>d</sup>	67,35 <sup>dc</sup>	3643,27 <sup>d</sup>	48,16 <sup>b</sup>
<b>B2</b>	A <sub>1</sub>	0 - 7	<ld	2,00 <sup>a</sup>	19,66 <sup>a</sup>	163,20	42112,37 <sup>a</sup>	<ld	13057,99 <sup>a</sup>	6,54 <sup>a</sup>	24,64 <sup>a</sup>	51,59 <sup>a</sup>	97,49 <sup>a</sup>	1710,60 <sup>a</sup>	88,86 <sup>a</sup>
	AB(C)	7 - 20	<ld	0,24 <sup>b</sup>	18,33 <sup>a</sup>	102,41	51222,06 <sup>b</sup>	<ld	11050,86 <sup>b</sup>	15,62 <sup>b</sup>	28,54 <sup>b</sup>	33,68 <sup>b</sup>	90,85 <sup>a</sup>	3263,24 <sup>b</sup>	76,00 <sup>a</sup>
	B <sub>1</sub> (C)	20 - 50	<ld	1,14 <sup>c</sup>	42,81 <sup>bc</sup>	106,65	46928,00 <sup>c</sup>	<ld	13498,37 <sup>c</sup>	11,64 <sup>cb</sup>	27,64 <sup>cb</sup>	35,80 <sup>cb</sup>	78,23 <sup>b</sup>	3409,95 <sup>cb</sup>	91,03 <sup>a</sup>
	B <sub>2</sub> (C)	50 - 60	<ld	0,63 <sup>d</sup>	22,88 <sup>a</sup>	164,06	43673,80 <sup>ac</sup>	<ld	13261,76 <sup>d</sup>	14,05 <sup>db</sup>	48,96 <sup>d</sup>	37,60 <sup>db</sup>	67,88 <sup>cd</sup>	2209,74 <sup>d</sup>	92,64 <sup>a</sup>
	C	60 - 100	<ld	0,68 <sup>d</sup>	34,40 <sup>c</sup>	104,20	34315,79 <sup>d</sup>	<ld	8496,82 <sup>e</sup>	15,14 <sup>cb</sup>	26,99 <sup>ab</sup>	18,57 <sup>e</sup>	70,92 <sup>db</sup>	3379,28 <sup>cb</sup>	51,06 <sup>b</sup>
<b>B3</b>	A <sub>11</sub>	0 - 10	<ld	0,62 <sup>a</sup>	13,97 <sup>a</sup>	146,67	42361,88 <sup>a</sup>	<ld	15051,94 <sup>a</sup>	10,22 <sup>a</sup>	24,48 <sup>a</sup>	29,11 <sup>a</sup>	106,38 <sup>a</sup>	2682,63 <sup>a</sup>	101,67 <sup>a</sup>
	A <sub>12</sub>	10 - 22	<ld	0,20 <sup>b</sup>	20,05 <sup>a</sup>	178,38	44749,18 <sup>a</sup>	<ld	14527,26 <sup>b</sup>	2,33 <sup>b</sup>	28,94 <sup>b</sup>	25,05 <sup>b</sup>	102,75 <sup>a</sup>	2168,52 <sup>b</sup>	105,94 <sup>a</sup>
	B <sub>1</sub>	22 - 35	<ld	1,17 <sup>c</sup>	46,43 <sup>b</sup>	84,82	53008,27 <sup>b</sup>	<ld	11176,84 <sup>c</sup>	14,20 <sup>a</sup>	31,39 <sup>c</sup>	32,88 <sup>c</sup>	118,02 <sup>b</sup>	2454,59 <sup>c</sup>	75,90 <sup>b</sup>
	B <sub>2</sub> (C)	35 - 55	<ld	0,37 <sup>d</sup>	38,20 <sup>cb</sup>	77,11	59304,56 <sup>c</sup>	<ld	12423,32 <sup>d</sup>	6,71 <sup>ab</sup>	25,56 <sup>a</sup>	12,53 <sup>d</sup>	109,86 <sup>a</sup>	2079,01 <sup>db</sup>	89,86 <sup>ab</sup>
	B <sub>22</sub> (C)	55 - 70	<ld	1,71 <sup>e</sup>	33,68 <sup>db</sup>	98,46	42260,12 <sup>a</sup>	<ld	9644,85 <sup>e</sup>	13,21 <sup>a</sup>	21,31 <sup>d</sup>	24,16 <sup>eb</sup>	103,50 <sup>a</sup>	1789,28 <sup>ef</sup>	56,87 <sup>c</sup>
	C	70 - 120	<ld	1,21 <sup>c</sup>	12,71 <sup>a</sup>	92,93	37008,62 <sup>d</sup>	<ld	7515,80 <sup>f</sup>	12,54 <sup>a</sup>	12,85 <sup>e</sup>	21,45 <sup>fe</sup>	112,70 <sup>ab</sup>	1922,77 <sup>fd</sup>	36,46 <sup>d</sup>
<b>B4</b>	A <sub>11</sub>	0 - 5	<ld	1,35 <sup>a</sup>	26,88 <sup>a</sup>	68,03	33038,07 <sup>a</sup>	<ld	8189,36 <sup>a</sup>	12,61 <sup>a</sup>	20,74 <sup>a</sup>	29,79 <sup>a</sup>	99,29	3689,86 <sup>a</sup>	49,76 <sup>a</sup>
	A <sub>12</sub>	5 - 15	<ld	0,09 <sup>b</sup>	25,90 <sup>a</sup>	75,54	39816,62 <sup>b</sup>	<ld	9695,84 <sup>b</sup>	17,44 <sup>b</sup>	14,40 <sup>b</sup>	24,92 <sup>b</sup>	98,98	3493,75 <sup>a</sup>	19,80 <sup>b</sup>
	B <sub>1</sub> (C)	15 - 30	<ld	1,01 <sup>c</sup>	22,04 <sup>a</sup>	162,68	48156,18 <sup>c</sup>	<ld	9555,96 <sup>c</sup>	14,87 <sup>ab</sup>	27,76 <sup>c</sup>	28,96 <sup>a</sup>	92,24	2202,46 <sup>b</sup>	74,44 <sup>c</sup>
	B <sub>2</sub> (C)	30 - 50	<ld	0,06 <sup>b</sup>	20,24 <sup>ab</sup>	121,41	42562,48 <sup>db</sup>	<ld	10123,20 <sup>d</sup>	2,27 <sup>c</sup>	20,52 <sup>a</sup>	30,87 <sup>a</sup>	103,43	2166,30 <sup>cb</sup>	64,94 <sup>dc</sup>
	B <sub>22</sub> (C)	50 - 70	<ld	1,06 <sup>c</sup>	28,42 <sup>ac</sup>	123,21	31672,17 <sup>a</sup>	<ld	7926,31 <sup>e</sup>	15,32 <sup>ab</sup>	16,08 <sup>db</sup>	14,61 <sup>c</sup>	100,00	2547,21 <sup>a</sup>	42,09 <sup>a</sup>

Les lettres a, b, c, d, e, f matérialisent la différence de significativité entre les moyennes d'un même profil

<ld = inférieure à la limite de détection

Au niveau du profil B2 (figure 53), profil de haut de versant, les éléments Cr, Mn, Ni et Zn sont plus concentrés dans les horizons d'accumulation, de type B (horizons B<sub>1</sub>(C)g et B<sub>2</sub>(C)), que dans les horizons organo-minéraux. Les éléments Pb et Sr sont, par contre, plus concentrés dans les horizons organo-minéraux de type A. Le Cr, le Pb, le Cu, le Mn et le Sr sont fortement concentrés dans le premier horizon (horizon A<sub>11</sub>). La teneur en Fe est très forte dans les horizons d'accumulation AB(C), B<sub>1</sub>(C)g et B<sub>2</sub>(C). La teneur en Mn, par contre, n'est forte que dans les horizons A<sub>11</sub>, B<sub>1</sub>(C)g et B<sub>2</sub>(C). Le Ti est fortement concentré, de l'horizon AB(C) jusqu'à l'horizon C. La teneur en Mo est très faible dans le premier horizon (A<sub>11</sub>), et évolue de 11,64 mg.kg<sup>-1</sup> à 15,62 mg.kg<sup>-1</sup> dans les autres horizons ; la tendance ici est à une forte concentration en profondeur. Le Cu est fortement concentré dans l'horizon A<sub>11</sub>, puis dans l'horizon B<sub>2</sub>(C). Le Cd est, en dehors de l'horizon AB(C), bien concentré dans les trois premiers horizons.

Au niveau du profil de moyen versant (B3) (figure 54), la situation est inverse pour le Cd, qui a des teneurs élevées au niveau des horizons profonds. Pour le Cu et le Zn, la concentration est plus forte dans les horizons organo-minéraux A<sub>11</sub> et A<sub>12</sub>. La valeur minimale du Cu est de 77,11 mg.kg<sup>-1</sup>, tandis que la maximale est à 178,38 mg.kg<sup>-1</sup>. Au niveau du Zn, la minimale est à 36,46 mg.kg<sup>-1</sup> et la maximale à 105,94 mg.kg<sup>-1</sup>. Les teneurs de Mn et de Zn décroissent, de la surface vers la profondeur, avec les plus grandes valeurs dans les horizons organo-minéraux A<sub>11</sub> et A<sub>12</sub>. Quant aux éléments Cr et Fe, ils sont abondants dans les horizons intermédiaires. La dynamique au niveau de ces deux éléments est une concentration moyenne dans les horizons organo-minéraux, forte dans les horizons d'accumulation, et faible dans l'horizon C. Le nickel (Ni) et Ti sont plus concentrés dans les quatre premiers horizons de ce profil, la teneur est faible dans l'horizon proche du C et dans l'horizon C.

Le Mo a des teneurs dépassant 10 dans les horizons A<sub>11</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>22</sub>(C) et C. La tendance ici est à une forte concentration dans les horizons, de B<sub>1</sub> jusqu'à l'horizon C. Quant au Sr, il a une dynamique sensiblement constante, depuis l'horizon de surface jusqu'à l'horizon le plus profond. La teneur minimale est de 102,75 mg.kg<sup>-1</sup>, et la maximale est à 118,02 mg.kg<sup>-1</sup>.

Au niveau du profil le plus bas (profil B4) (figure 55), les éléments Cu, Fe, Ni, Zn sont plus concentrés dans les horizons intermédiaires B<sub>1</sub>(C), B<sub>2</sub>(C) et B<sub>22</sub>(C). Pour le Sr, ce sont seulement les horizons B<sub>2</sub>(C) et B<sub>22</sub>(C) qui sont plus concentrés.

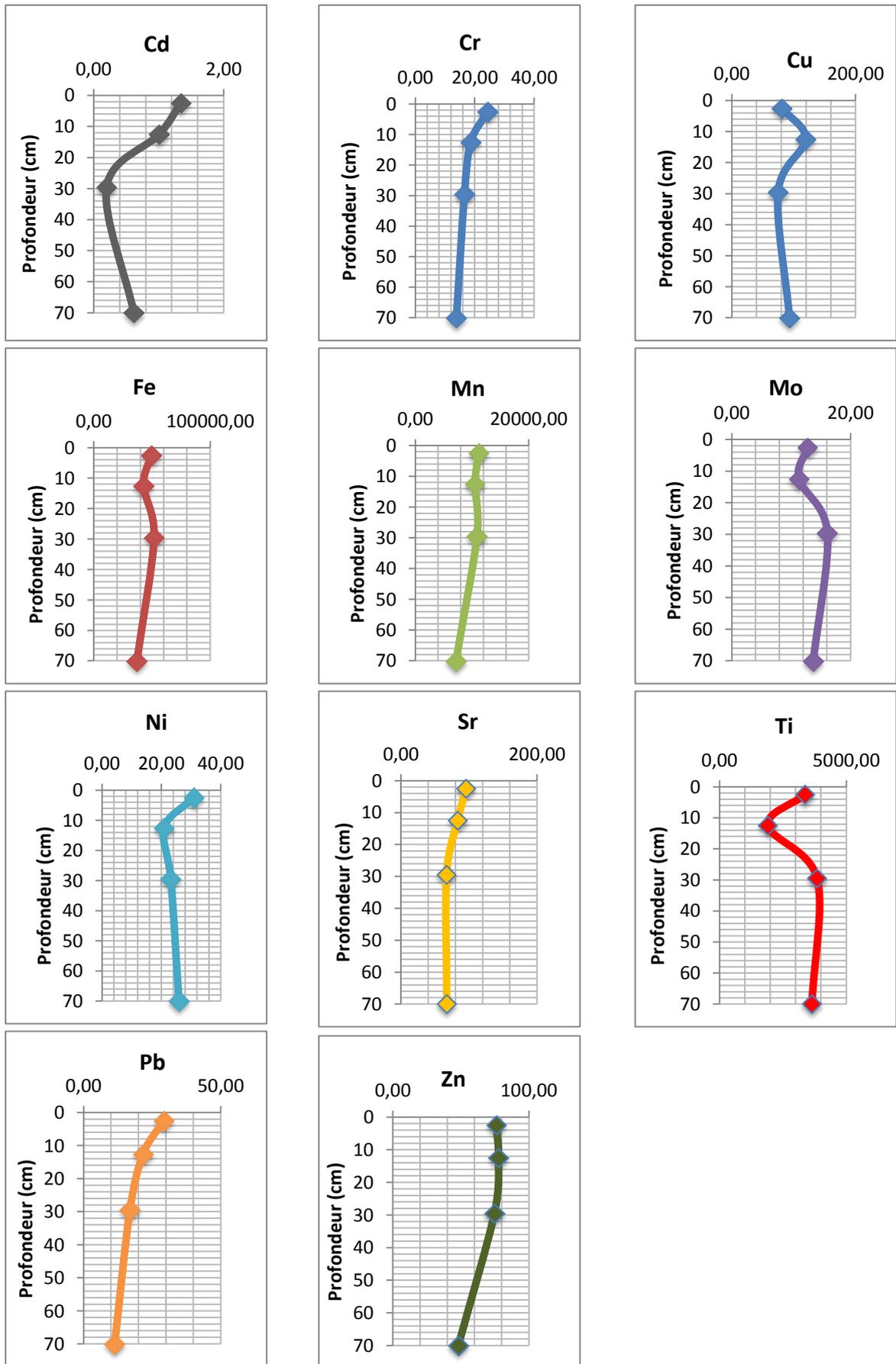


Figure 52 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil B1

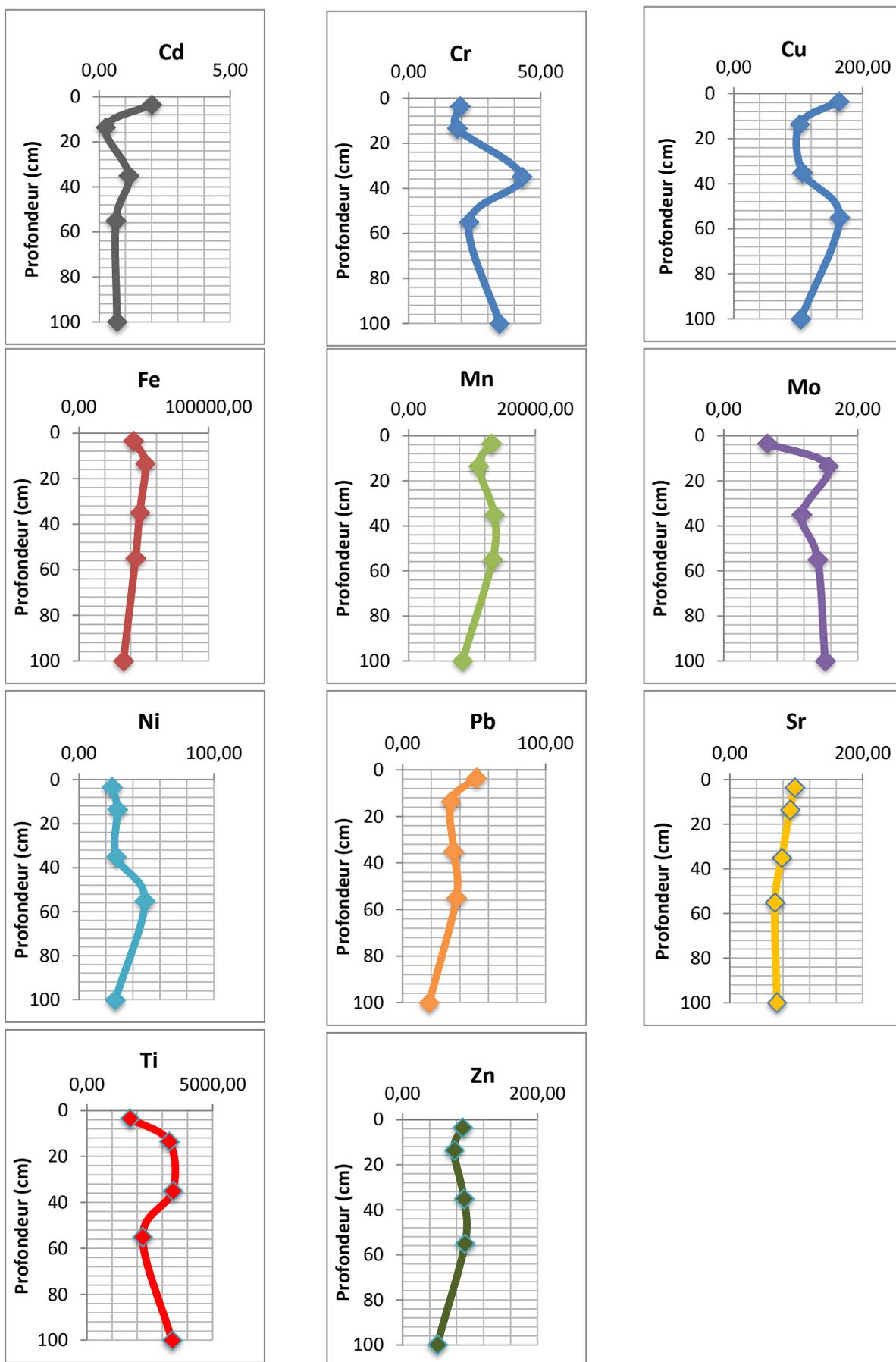


Figure 53 : Dynamique latérale des ETM dosés au niveau du profil B2

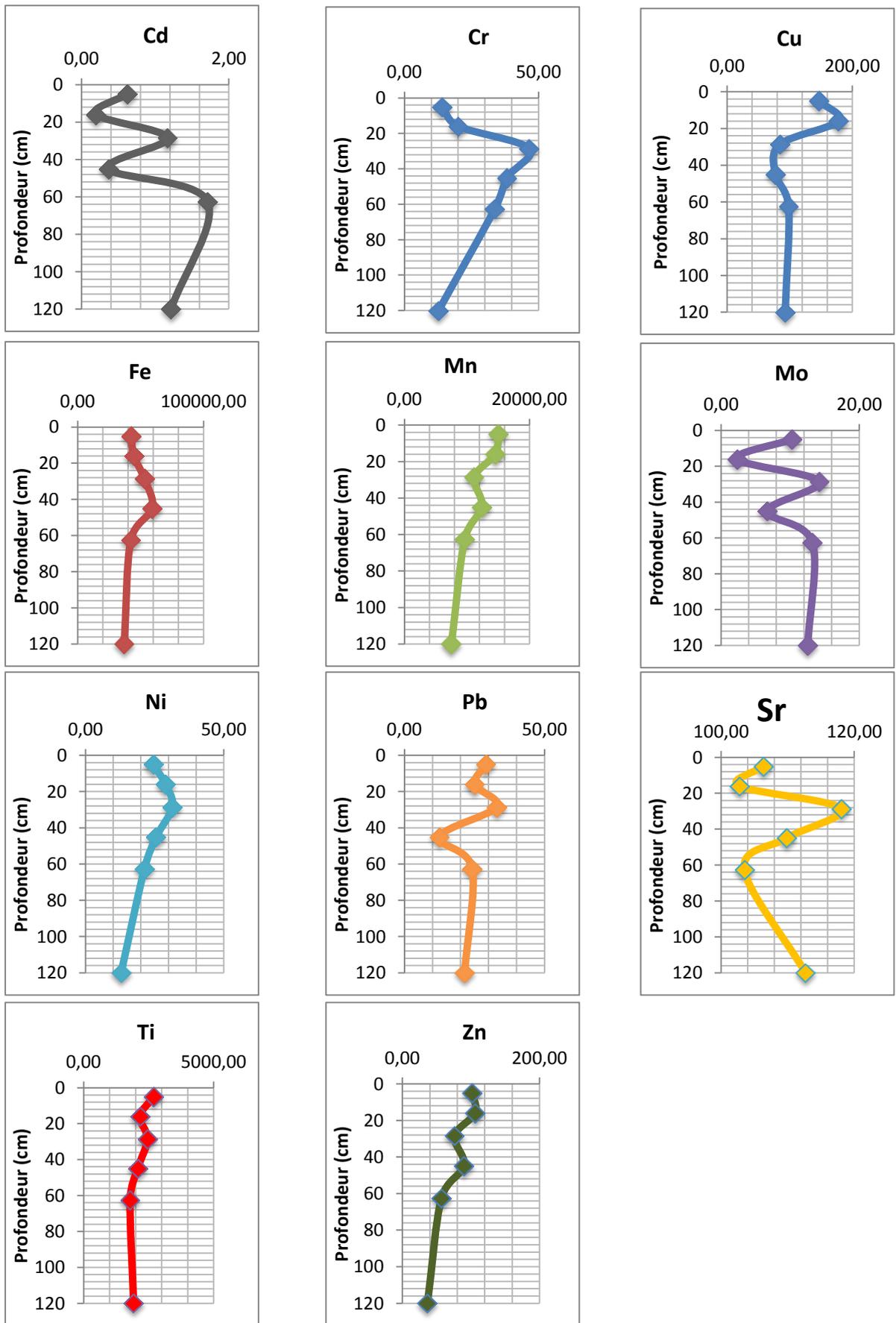


Figure 54 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil B3

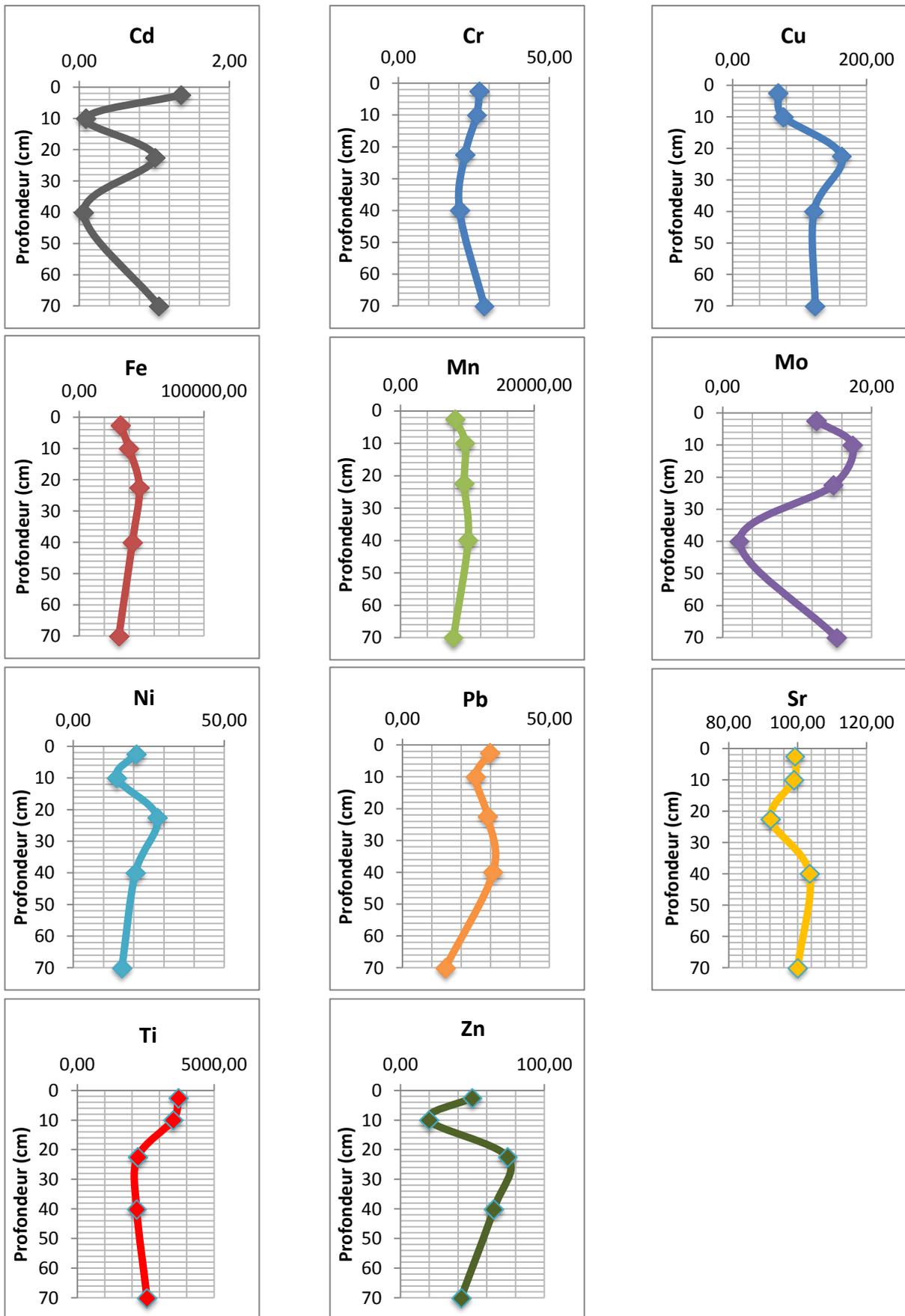


Figure 55 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil B4

Concernant Cr, la dynamique verticale est le passage d'une concentration forte de l'horizon A<sub>11</sub> de surface à une concentration faible dans l'horizon B<sub>2</sub>(C) d'accumulation et, à partir de ce niveau, la concentration augmente à nouveau. Mn est fortement concentré dans les horizons A<sub>12</sub>, B<sub>1</sub>(C) et B<sub>2</sub>(C), tandis que Pb, est plus concentré dans les quatre premiers horizons, notamment, ceux organo-minéraux et d'accumulation. Ti, quant à lui, décroît de l'horizon de surface à celui de profondeur. Pour le Cd, les horizons A<sub>11</sub>, B<sub>1</sub>(C) et B<sub>22</sub>(C) sont les plus concentrés. La teneur en Mo semble forte dans les trois premiers horizons, surtout dans les horizons organo-minéraux.

Enfin, les valeurs du mercure (Hg) et de l'arsenic (As) sont toutes inférieures à 0,25 mg.kg<sup>-1</sup> dans tous les horizons de tous les profils analysés.

#### **5.3.2.1.2. Dynamique latérale des ETM étudiés**

Le tableau XXV présente les valeurs moyennes des différents ETM étudiés par profil et par tranche d'horizons organo-minéraux (Hs) et non humifères, ou de profondeur (Hp). La couverture latérale de ces ETM a donc été examinée, depuis le sommet de chaque colline jusqu'au bas de versant. Les études statistiques, notamment l'analyse de la variance, ont indiqué une différence significative pour chaque ETM, au seuil de probabilité  $\alpha = 0,05$ , à l'exception du Cu. La figure 56 rend compte de la dynamique latérale de ces ETM au Blafo. Sur le site du Blafo, les concentrations en Mn et Pb sont plus fortes dans les horizons humifères, du sommet jusqu'au bas de versant. En revanche, Mo est plus concentré dans les horizons profonds, du haut de versant au moyen versant, et, pour le bas de versant, les horizons supérieurs, humifères, en sont plus riches. La dynamique latérale du Sr, du Cd et du Fe est telle que la tranche d'horizons humifères est plus concentrée en ces éléments, du sommet au moyen versant.

Au niveau du Cu et du Zn, la couverture latérale dans les horizons humifères, du sommet jusqu'au moyen versant, est plus intense que dans les horizons de profondeur. Ti est plus riche dans les horizons de profondeur, du sommet au haut versant, mais du haut versant au bas de versant, le phénomène est inverse. Pour Ni, c'est seulement au moyen versant que les horizons de surface sont les plus riches. La concentration en Ni est plus forte dans les horizons de profondeur, du sommet au haut versant, et du moyen versant au bas versant. La dynamique du Cr est à une concentration forte, dans la tranche d'horizons de profondeur, du haut versant au moyen versant.

Tableau XXV : Teneur totale des ETM dosés par tranche d'horizons organo-minéraux et horizons de profondeur dans les sols du Blafo

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Concentration en mg.kg <sup>-1</sup>												
			As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn
<b>B1</b>	Hs	0 - 20	<ld	1,17	21,55	99,93	46081,66	<ld	10854,93	12,05	25,90	25,51	79,06	2643,49	76,89
	Hp	20 - 70	<ld	0,41	15,20	84,03	44427,74	<ld	9027,87	14,91	24,56	14,11	67,18	3745,47	61,44
<b>B2</b>	Hs	0 - 20	<ld	1,12	19,00	132,80	46667,22	<ld	12054,43	11,08	26,59	42,64	94,17	2486,92	82,43
	Hp	20 - 100	<ld	0,82	33,36	124,75	41639,19	<ld	11752,32	13,61	34,53	30,65	72,34	2999,66	78,24
<b>B3</b>	Hs	0 - 22	<ld	0,41	17,02	162,53	43555,50	<ld	14789,60	6,13	26,71	27,08	104,57	2425,58	103,81
	Hp	22 - 120	<ld	1,12	32,75	88,33	47895,50	<ld	10190,20	11,66	22,78	22,75	111,02	2061,41	64,77
<b>B4</b>	Hs	0 - 15	<ld	0,72	26,39	71,79	36427,33	<ld	8942,60	15,03	17,57	27,36	99,14	3591,81	34,78
	Hp	15 - 70	<ld	0,71	23,57	135,77	40796,89	<ld	9201,82	10,82	21,45	24,82	98,55	2305,32	60,49

<ld = inférieure à la limite de détection

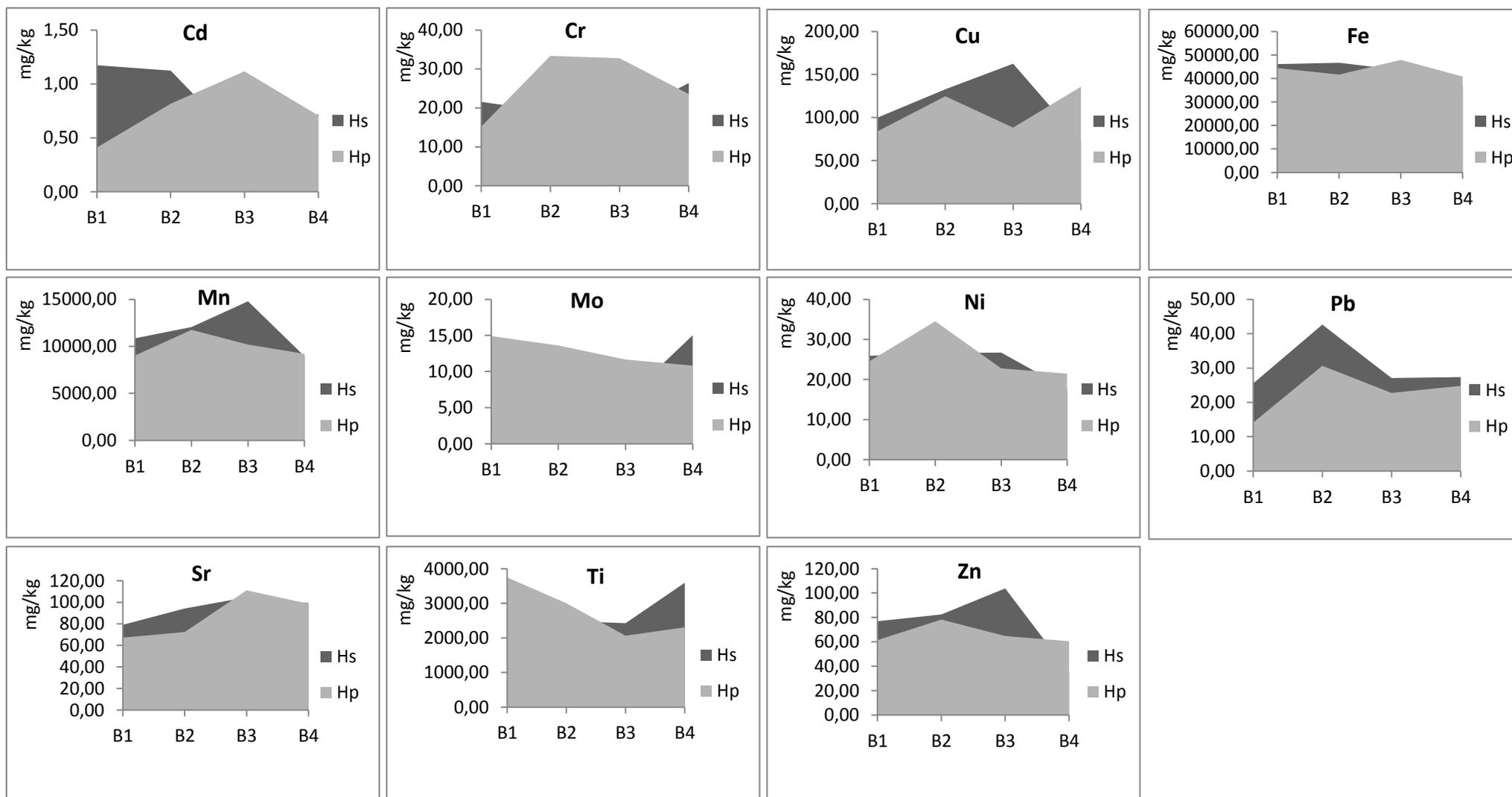


Figure 56 : Couverture latérale des ETM étudiés par tranche d'horizons organo-minéraux (Hs) et horizons de profondeur (Hp), du sommet au bas de versant de la colline Blafo

### 5.3.2.2. Teneur en ETM des sols du Guéto

#### 5.3.2.2.1. Dynamique verticale des ETM étudiés

L'expression des valeurs moyennes, pour la concentration en chaque élément trace métallique (ETM) étudié, par tranche d'horizons et par profil, dans les sols du Guéto, est indiquée dans le tableau XXVI.

La dynamique verticale des ETM du profil de sommet (profil G1) (figure 57), est telle que les éléments Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Sr, Ti et Zn ont de très fortes teneurs dans les horizons organo-minéraux A<sub>11</sub> et A<sub>12</sub>, jusqu'à 25 cm de profondeur. L'élément Cd est concentré de 0,07 mg.kg<sup>-1</sup> à 1,34 mg.kg<sup>-1</sup>, plus fortement dans l'horizon A<sub>11</sub>. L'horizon de type AB, transitoire entre les horizons organo-minéraux et les horizons d'accumulation, a la plus faible teneur. Cette situation est la même pour Cu, Mn, Ti et Zn, où, respectivement, les teneurs, dans cet horizon AB transitoire sont de 101,74 mg.kg<sup>-1</sup>, 4734,32 mg.kg<sup>-1</sup>, 1876,57 mg.kg<sup>-1</sup> et 26,94 mg.kg<sup>-1</sup>. La teneur en Sr décroît, de la surface à la profondeur, avec une teneur plus forte dans l'horizon A<sub>11</sub>. Au niveau du Pb, les valeurs vont de 14,44 à 35,29, avec des concentrations plus fortes dans les horizons d'accumulation de type B. Ainsi, pour les horizons AB, B<sub>1</sub>(C), B<sub>2</sub>(C) les teneurs sont, respectivement, de 22,57 mg.kg<sup>-1</sup>, 21,87 mg.kg<sup>-1</sup> et 35,29 mg.kg<sup>-1</sup>, tandis que les teneurs dans les horizons A<sub>11</sub> et A<sub>12</sub> sont 14,44 mg.kg<sup>-1</sup> et 19,71 mg.kg<sup>-1</sup>. Les concentrations du Fe sont plus fortes, de l'horizon AB à l'horizon B<sub>2</sub>(C), avec des teneurs respectives de 40020,65 mg.kg<sup>-1</sup>, 43364,52 mg.kg<sup>-1</sup> et 37617,62 mg.kg<sup>-1</sup>. Mo est fortement concentré, de l'horizon A<sub>12</sub> à l'horizon B<sub>1</sub>(C). Quant à Ni, il est plus dense dans l'horizon humifère A<sub>11</sub> et est à concentration presque constante, tournant autour de 14 mg.kg<sup>-1</sup>, dans les autres horizons.

Concernant le profil de haut versant (G2) (figure 58), les plus fortes concentrations en Cd, Ni et Zn se retrouvent dans les horizons supérieurs, jusqu'à 25 cm de profondeur. En revanche, pour les autres éléments que sont Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb, Sr et Ti, c'est la tranche d'horizons de 25 à 160 cm qui contient les plus fortes concentrations. Les teneurs de Cu et de Pb sont fortes dans le dernier horizon, le plus profond. Cr est très concentré dans les horizons de profondeur et Ni dans les horizons intermédiaires. L'horizon A<sub>11</sub> du profil indique une teneur en Cu identique à celle de l'horizon B<sub>22</sub>(g)(C). Même si les horizons de profondeurs sont les plus riches en Fe, l'on constate que les horizons A<sub>11</sub> et A<sub>12</sub> ont des teneurs non négligeables, à l'exception de l'horizon B<sub>1</sub>, qui est moins riche en cet élément, avec une concentration de 33625,63 mg.kg<sup>-1</sup>.

Tableau XXVI : Teneur totale en ETM dans les sols issus du Guéto

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Concentration en mg.kg <sup>-1</sup>												
			As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn
<b>G1</b>	A <sub>11</sub>	0 - 10	<ld	1,34 <sup>a</sup>	16,67 <sup>a</sup>	195,30	34647,02 <sup>ad</sup>	<ld	8811,28 <sup>a</sup>	10,81 <sup>a</sup>	26,11 <sup>a</sup>	14,44 <sup>a</sup>	127,25 <sup>a</sup>	4514,00 <sup>a</sup>	53,34 <sup>a</sup>
	A <sub>12</sub>	10 - 25	<ld	1,27 <sup>b</sup>	26,65 <sup>b</sup>	139,61	31254,88 <sup>a</sup>	<ld	9398,65 <sup>b</sup>	15,94 <sup>b</sup>	14,93 <sup>b</sup>	19,71 <sup>b</sup>	126,52 <sup>a</sup>	3409,56 <sup>b</sup>	47,43 <sup>ac</sup>
	AB	25 - 40	<ld	0,07 <sup>c</sup>	15,11 <sup>a</sup>	101,74	40020,65 <sup>b</sup>	<ld	4734,32 <sup>c</sup>	15,78 <sup>cb</sup>	13,62 <sup>cb</sup>	22,57 <sup>cd</sup>	114,62 <sup>b</sup>	1876,57 <sup>c</sup>	26,94 <sup>b</sup>
	B <sub>1</sub> (C)	40 - 65	<ld	0,25 <sup>d</sup>	12,97 <sup>a</sup>	146,67	43364,52 <sup>cb</sup>	<ld	5302,79 <sup>d</sup>	15,76 <sup>db</sup>	14,64 <sup>db</sup>	21,87 <sup>db</sup>	110,93 <sup>cb</sup>	3180,04 <sup>d</sup>	35,64 <sup>cd</sup>
	B <sub>2</sub> (C)	65 - 120	<ld	0,50 <sup>e</sup>	18,42 <sup>a</sup>	133,67	37617,62 <sup>d</sup>	<ld	6779,31 <sup>e</sup>	10,81 <sup>a</sup>	12,62 <sup>ec</sup>	35,29 <sup>e</sup>	108,32 <sup>db</sup>	3574,13 <sup>eb</sup>	39,35 <sup>de</sup>
<b>G2</b>	A <sub>1</sub>	0 - 10	<ld	1,23 <sup>a</sup>	14,89	113,69	34351,22 <sup>a</sup>	<ld	6412,27 <sup>a</sup>	10,58 <sup>a</sup>	18,03 <sup>a</sup>	23,61 <sup>a</sup>	154,94 <sup>a</sup>	1726,90 <sup>a</sup>	45,16 <sup>a</sup>
	A <sub>3</sub>	10 - 25	<ld	1,67 <sup>b</sup>	15,70	81,40	39403,14 <sup>b</sup>	<ld	4930,82 <sup>b</sup>	9,89 <sup>a</sup>	26,87 <sup>b</sup>	20,52 <sup>b</sup>	149,08 <sup>ad</sup>	3445,73 <sup>b</sup>	30,00 <sup>b</sup>
	B <sub>1</sub>	25 - 43	<ld	1,63 <sup>cb</sup>	18,05	92,80	33625,63 <sup>a</sup>	<ld	8408,91 <sup>c</sup>	20,78 <sup>b</sup>	18,48 <sup>a</sup>	24,43 <sup>a</sup>	139,41 <sup>bd</sup>	4925,88 <sup>c</sup>	47,99 <sup>a</sup>
	B <sub>21</sub> (g)	43 - 70	<ld	0,64 <sup>d</sup>	17,79	102,33	47685,24 <sup>c</sup>	<ld	5149,76 <sup>d</sup>	9,88 <sup>a</sup>	27,86 <sup>cb</sup>	19,29 <sup>cb</sup>	153,79 <sup>ad</sup>	2938,72 <sup>d</sup>	30,09 <sup>cb</sup>
	B <sub>22</sub> (g)(C)	70 - 160	<ld	0,20 <sup>e</sup>	20,03	116,08	41041,92 <sup>db</sup>	<ld	4229,58 <sup>e</sup>	14,72 <sup>c</sup>	15,00 <sup>d</sup>	41,95 <sup>d</sup>	192,84 <sup>c</sup>	3735,43 <sup>e</sup>	28,59 <sup>db</sup>
<b>G3</b>	A <sub>1</sub>	0 - 20	<ld	1,99 <sup>a</sup>	57,07 <sup>a</sup>	45,53	42218,30 <sup>a</sup>	<ld	14538,74 <sup>a</sup>	15,75 <sup>a</sup>	23,86 <sup>a</sup>	25,58 <sup>a</sup>	156,82 <sup>a</sup>	3201,01 <sup>a</sup>	95,20 <sup>a</sup>
	AB	20 - 60	<ld	0,62 <sup>b</sup>	38,02 <sup>b</sup>	218,01	37479,37 <sup>b</sup>	<ld	15572,69 <sup>b</sup>	13,08 <sup>b</sup>	36,05 <sup>b</sup>	20,09 <sup>b</sup>	149,14 <sup>ac</sup>	2679,87 <sup>b</sup>	106,76 <sup>a</sup>
	B <sub>1</sub>	60 - 100	<ld	0,26 <sup>c</sup>	16,71 <sup>cd</sup>	188,85	35185,07 <sup>cb</sup>	<ld	8909,99 <sup>c</sup>	8,59 <sup>c</sup>	17,89 <sup>c</sup>	18,81 <sup>cb</sup>	165,16 <sup>ad</sup>	5493,28 <sup>c</sup>	51,23 <sup>b</sup>
	B <sub>2</sub> (g)(C)	100 - 200	<ld	0,40 <sup>d</sup>	15,20 <sup>d</sup>	263,46	52707,18 <sup>d</sup>	<ld	10178,60 <sup>d</sup>	11,79 <sup>db</sup>	18,23 <sup>dc</sup>	16,79 <sup>dc</sup>	189,57 <sup>b</sup>	3177,73 <sup>a</sup>	74,00 <sup>c</sup>
<b>G4</b>	A <sub>1</sub>	0 - 15	<ld	0,05 <sup>a</sup>	30,16 <sup>a</sup>	98,23	27918,30 <sup>a</sup>	<ld	6502,68 <sup>a</sup>	10,98 <sup>a</sup>	21,92 <sup>a</sup>	13,10 <sup>a</sup>	106,46 <sup>a</sup>	1387,91 <sup>a</sup>	35,48 <sup>a</sup>
	A <sub>3</sub>	15 - 47	<ld	0,55 <sup>b</sup>	38,91 <sup>b</sup>	120,80	32417,81 <sup>b</sup>	<ld	7243,58 <sup>b</sup>	15,71 <sup>b</sup>	26,97 <sup>b</sup>	23,81 <sup>b</sup>	102,20 <sup>a</sup>	2191,27 <sup>b</sup>	47,76 <sup>b</sup>
	B <sub>1</sub>	47 - 100	<ld	2,51 <sup>c</sup>	20,08 <sup>cd</sup>	107,53	25965,62 <sup>a</sup>	<ld	5903,16 <sup>c</sup>	1,67 <sup>c</sup>	16,31 <sup>c</sup>	48,51 <sup>c</sup>	91,36 <sup>b</sup>	2135,06 <sup>cb</sup>	34,49 <sup>a</sup>
	B <sub>2</sub> FeC	100 - 140	<ld	1,09 <sup>d</sup>	13,77 <sup>d</sup>	168,21	53321,03 <sup>c</sup>	<ld	11151,49 <sup>d</sup>	14,69 <sup>db</sup>	31,55 <sup>d</sup>	13,26 <sup>a</sup>	119,81 <sup>c</sup>	790,00 <sup>d</sup>	76,92 <sup>c</sup>
<b>G5</b>	A <sub>1</sub>	0 - 15	<ld	1,24 <sup>a</sup>	39,49	117,32	38336,15 <sup>a</sup>	<ld	8781,15 <sup>a</sup>	9,86 <sup>a</sup>	31,31 <sup>a</sup>	44,38	84,81	2690,86	52,90
	AB(C)	15 - 200	<ld	1,98 <sup>b</sup>	49,98	86,83	31755,03 <sup>b</sup>	<ld	7616,13 <sup>b</sup>	11,78 <sup>b</sup>	19,43 <sup>b</sup>	42,49	82,47	2576,33	42,61

Les lettres a, b, c, d, e, f matérialisent la différence de significativité entre les moyennes d'un même profil

<ld = inférieure à la limite de détection

Mn est plus fortement concentré dans l'horizon B<sub>1</sub>, alors que c'est le contraire pour Fe. La teneur minimale de Mn est observée dans l'horizon B<sub>22</sub>(g)(C), avec un taux de 4229,58 mg.kg<sup>-1</sup>.

Les éléments Cd, Cr, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn sont très concentrés dans les 2 premiers horizons, à partir de la surface, au niveau du profil G3 (figure 59). Seuls Cu, Fe et Sr ont des fortes teneurs dans le dernier horizon, de type B (horizon B<sub>2</sub>(g)(C)). Dans l'ensemble, on note que la tranche humifère, allant de 0 à 20 cm, est très riche en Cd, Cr, Fe, Mn, Mo, Pb et Zn, par rapport à la couche profonde, de 20 à 200 cm. Pour le reste des éléments (Cu, Ni, Sr et Ti), c'est le phénomène contraire.

Au niveau du profil G4 (figure 60), situé au 1/3 inférieur du moyen versant, Cd, Cu, Mn et Zn sont fortement concentrés dans les 3 derniers horizons. Cr, étant plus riche dans les 2 premiers horizons. Quant au Pb, il est plus concentré dans les horizons intermédiaires A<sub>3</sub> et B<sub>1</sub> argileux. L'horizon d'accumulation B<sub>2</sub>FeC, à faciès d'induration ferro-manganique, contient les plus fortes teneurs en Cu, Fe, Mn, Ni, Sr et Zn, dont les valeurs respectives sont 168,21 mg.kg<sup>-1</sup>, 53321,03 mg.kg<sup>-1</sup>, 11151,49 mg.kg<sup>-1</sup>, 31,55 mg.kg<sup>-1</sup>, 119,81 mg.kg<sup>-1</sup> et 76,92 mg.kg<sup>-1</sup>. Les teneurs du Ti sont plus fortes dans les horizons A<sub>3</sub> et B<sub>1</sub>, plus argileux. Mo est plus concentré dans les horizons A<sub>3</sub> et B<sub>2</sub>FeC, avec une très faible valeur dans l'horizon B<sub>1</sub>. Dans l'ensemble, Cr, Mo, Ni et Ti sont fortement concentrés dans la tranche d'horizon de 0 à 47 cm, tandis que pour les autres éléments que sont : Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Sr et Zn, c'est le phénomène contraire. Ils sont donc plus fortement présents dans la tranche de 47 cm à 140 cm.

Pour le dernier profil (profil G5) (figure 61), situé au bas de versant, les éléments Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr, Ti et Zn sont plus concentrés dans l'horizon de surface A<sub>1</sub>. Par contre, Cd, Cr et Mo sont plus concentrés en profondeur. La tranche de l'horizon de surface A<sub>1</sub> part de 0 à 15 cm, tandis que celle de profondeur, de type AB(C), part de 15 à 200 cm.

#### **5.3.2.2.2. Dynamique latérale des ETM étudiés**

La compréhension de la dynamique latérale des divers ETM étudiés au niveau des sols du Guéto est, tout comme au Blafo, appréhendée depuis le sommet jusqu'au bas de versant de la colline. Ainsi, à partir des données exposées dans le tableau XXVII, l'on a dégagé la couverture latérale de ces éléments (figure 62).

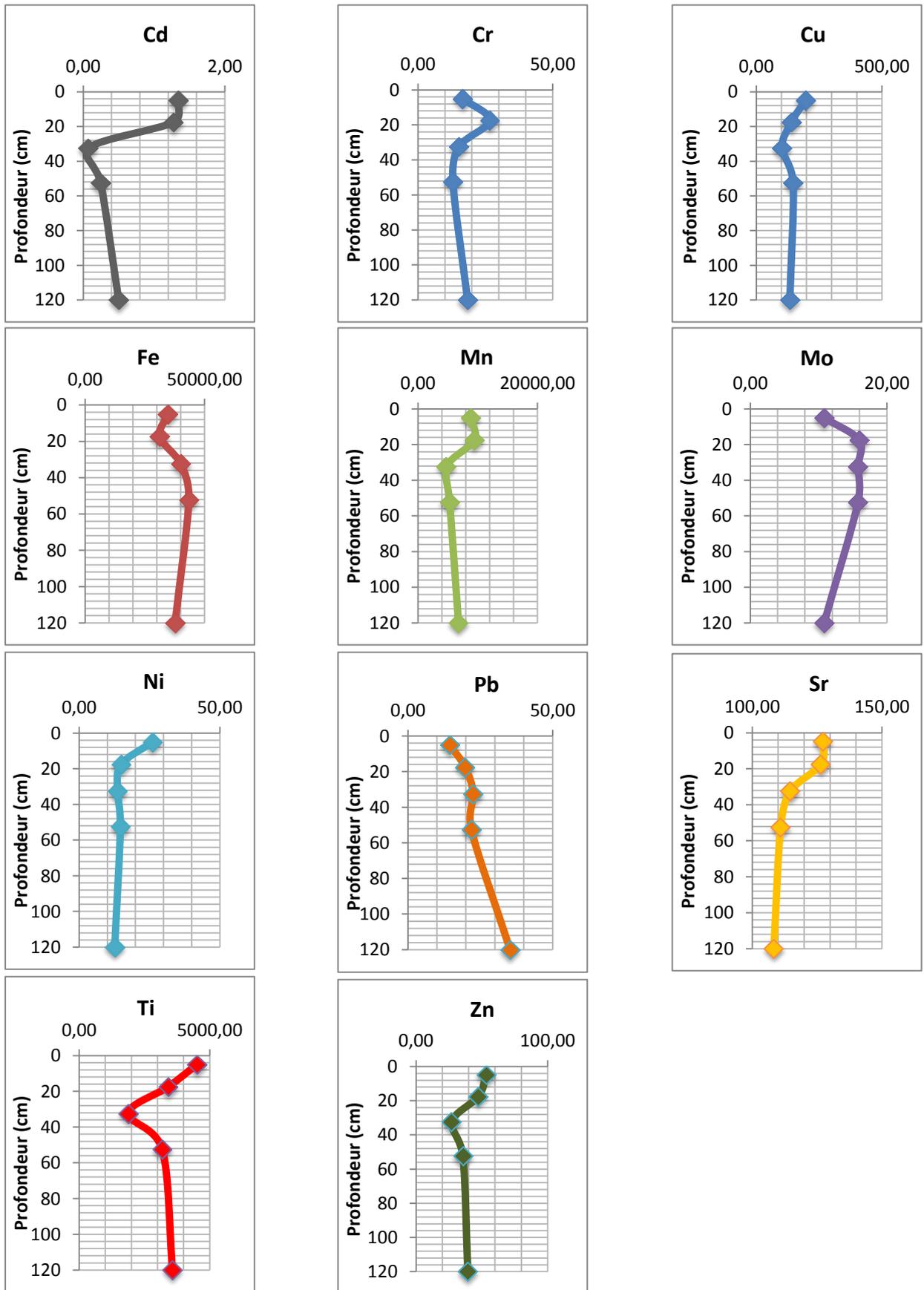


Figure 57 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil G1

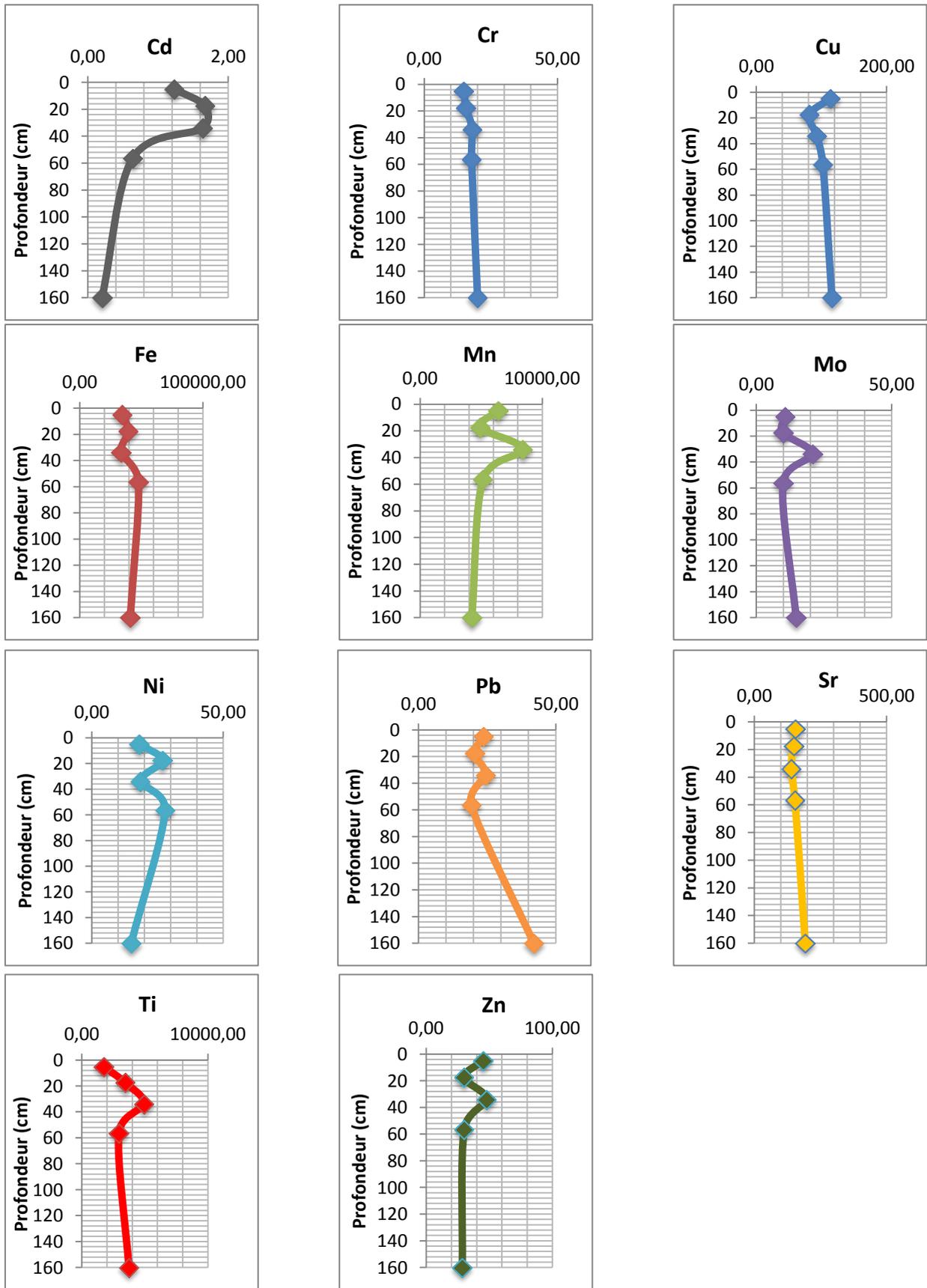


Figure 58 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil G2

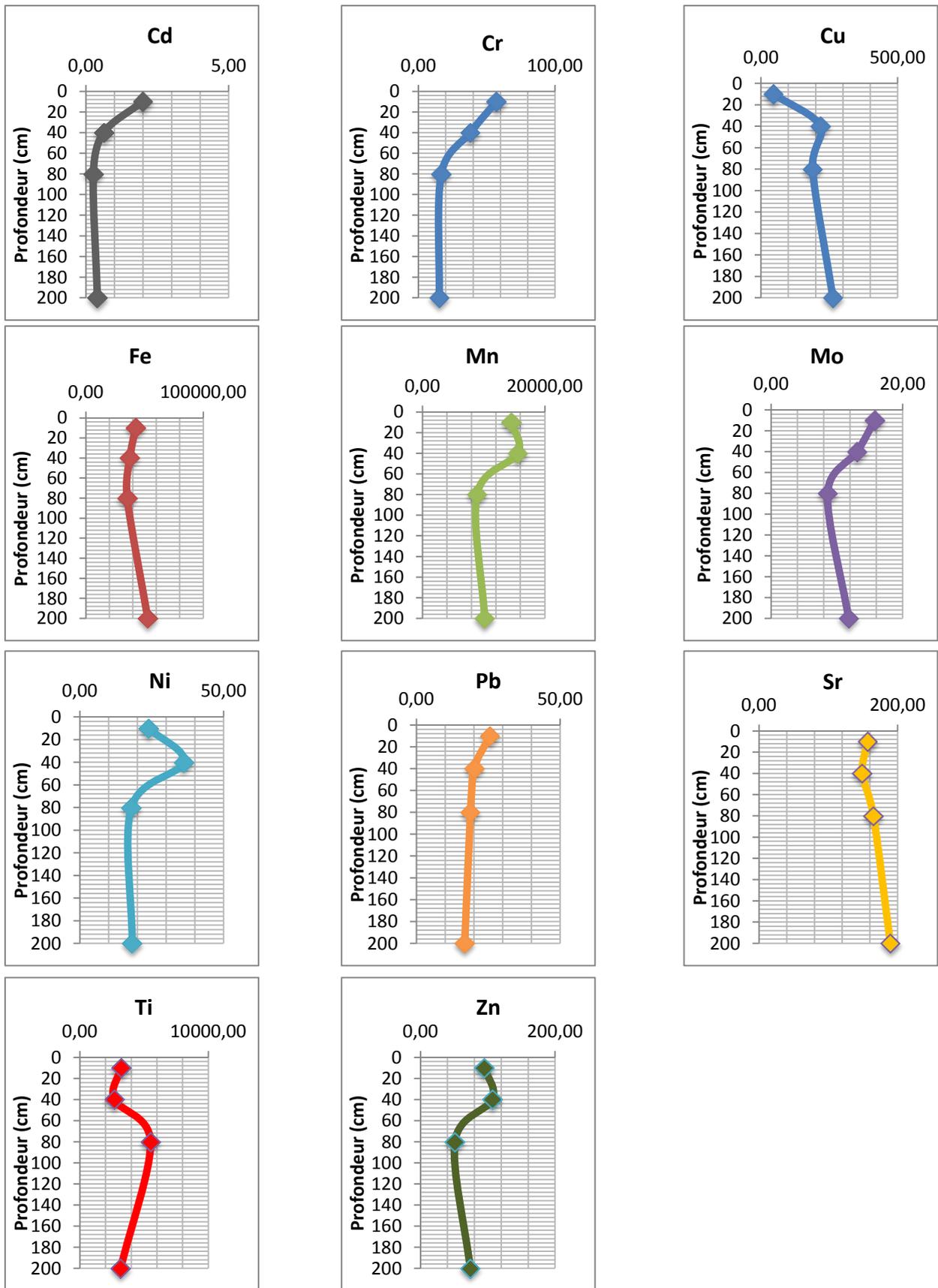


Figure 59 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil G3

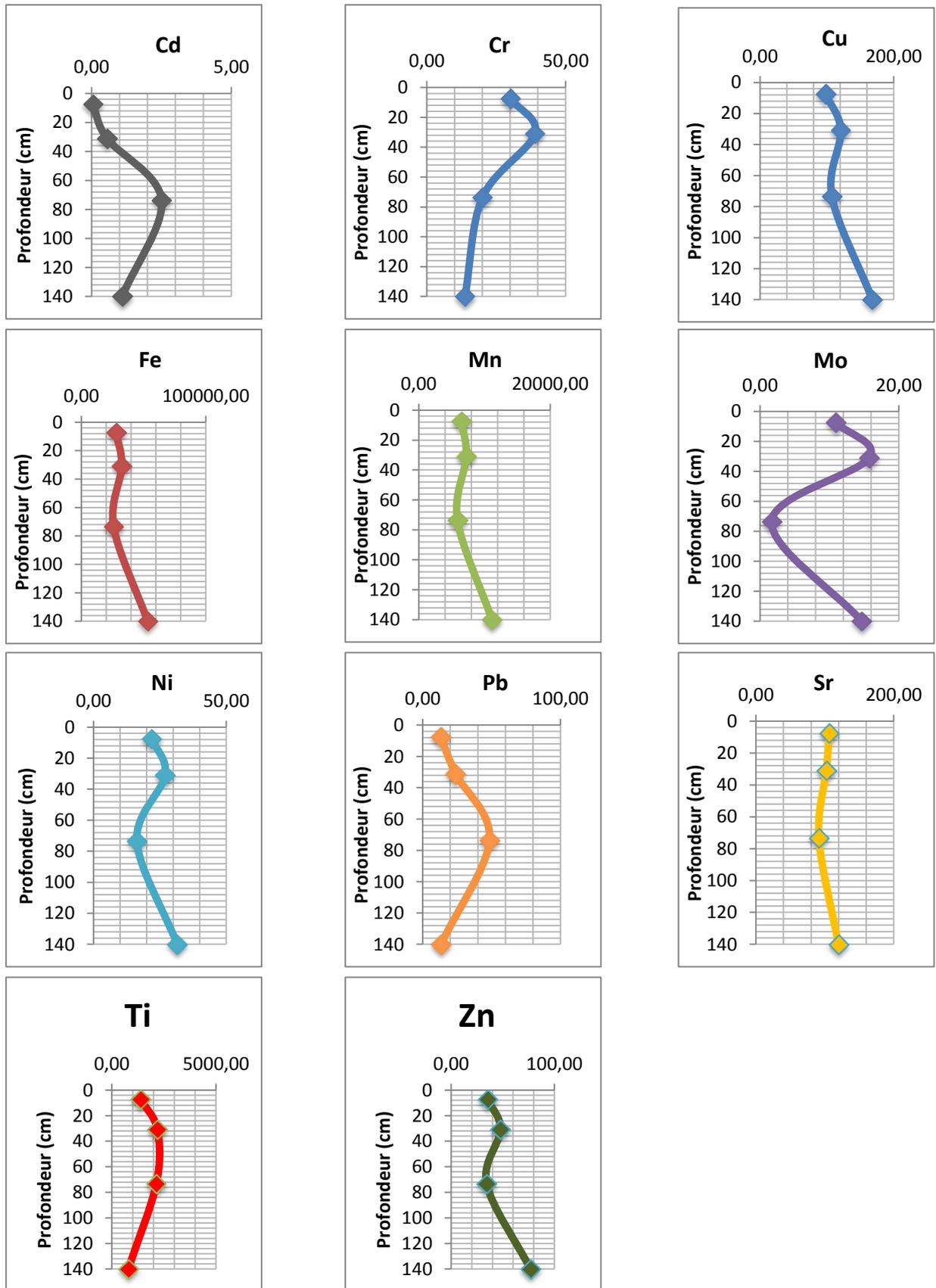


Figure 60 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil G4

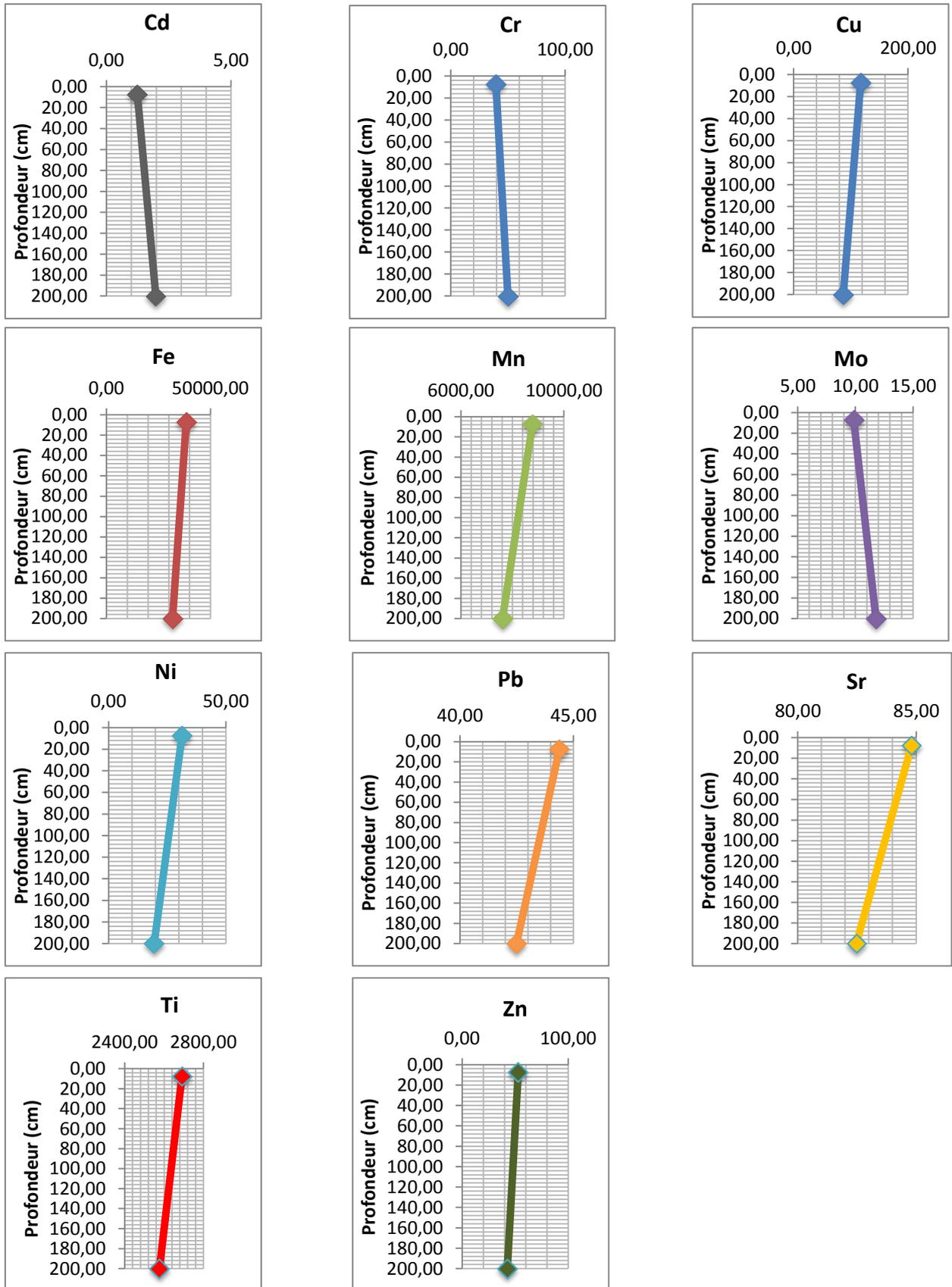


Figure 61 : Dynamique verticale des ETM dosés au niveau du profil G5

Tableau XXVII : Teneur totale des ETM dosés par tranche d'horizons organo-minéraux et horizons de profondeur dans les sols du Guéto

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Concentration en mg.kg <sup>-1</sup>												
			As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn
<b>G1</b>	Hs	0 - 25	<ld	1,31	21,66	142,90	32950,95	<ld	9104,97	13,38	20,52	17,07	126,89	3961,78	50,38
	Hp	25 - 120	<ld	0,27	15,50	127,36	40334,26	<ld	5605,47	14,11	13,63	27,13	111,29	2876,92	33,98
<b>G2</b>	Hs	0 - 25	<ld	1,45	15,30	97,54	36877,18	<ld	5671,55	10,24	22,45	22,06	152,01	2586,32	37,58
	Hp	25 - 160	<ld	0,82	18,63	103,79	40784,26	<ld	5929,42	15,13	20,44	28,55	162,01	3866,68	35,55
<b>G3</b>	Hs	0 - 20	<ld	1,99	57,07	45,52	42218,30	<ld	14538,74	15,75	23,85	25,57	156,82	3201,01	95,20
	Hp	20 - 200	<ld	0,43	23,31	223,44	41790,54	<ld	11553,76	11,15	24,05	18,56	167,95	3783,62	77,33
<b>G4</b>	Hs	0 - 47	<ld	0,30	34,54	109,52	30168,00	<ld	6873,13	13,34	24,44	18,46	104,33	1789,59	41,62
	Hp	47 - 140	<ld	1,80	16,92	137,87	39643,17	<ld	8527,33	8,18	23,93	30,89	105,59	1462,53	55,71
<b>G5</b>	Hs	0 - 15	<ld	1,25	39,49	117,32	38336,33	<ld	8781,15	9,86	31,31	44,38	84,81	2690,86	52,90
	Hp	15 - 200	<ld	1,98	49,98	86,83	31755,00	<ld	7616,13	11,78	19,43	42,49	82,47	2576,33	42,61

<ld = inférieure à la limite de détection

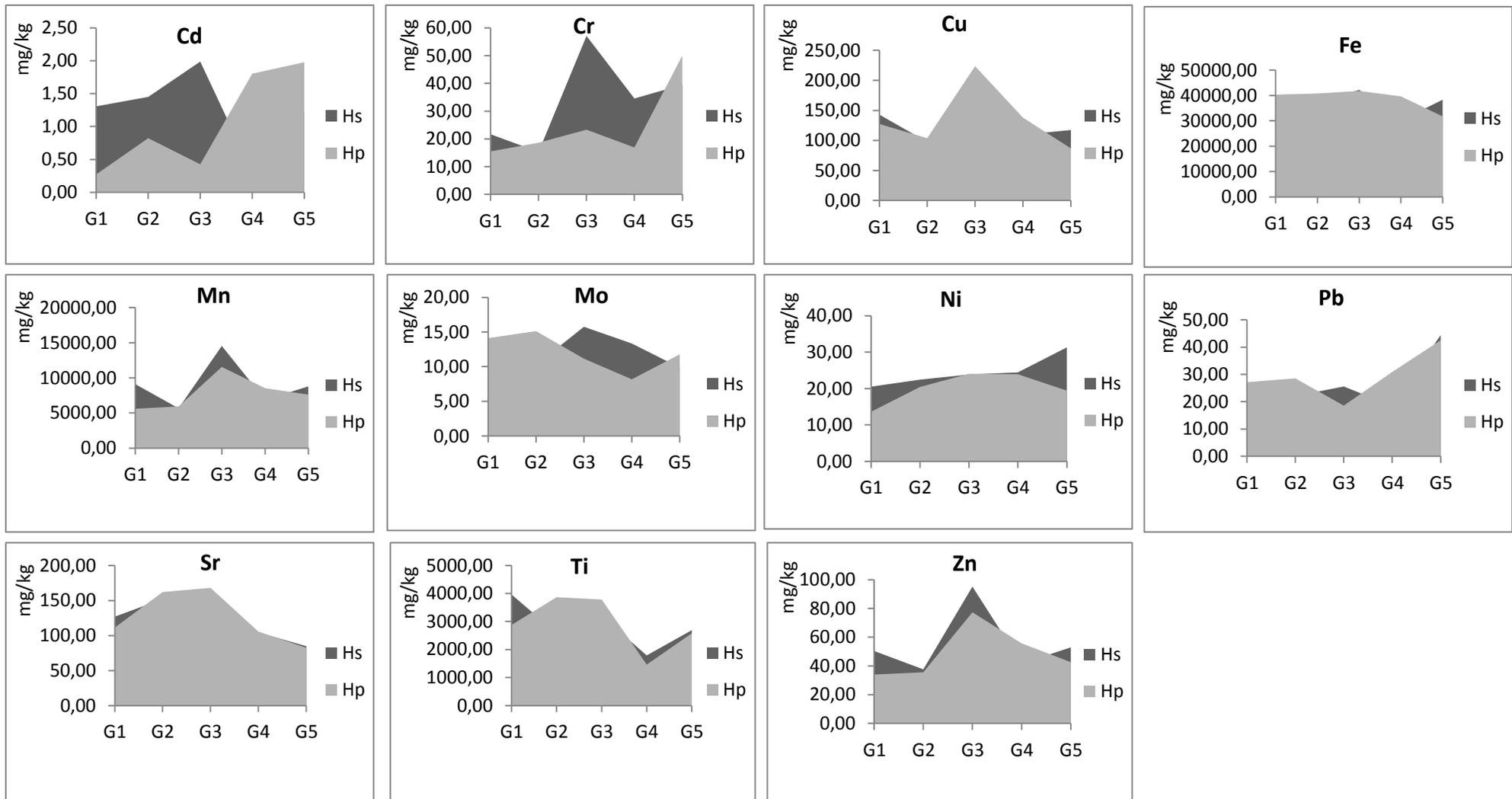


Figure 62 : Couverture latérale des ETM étudiés par tranche d'horizons organo-minéraux (Hs) et horizons de profondeur (Hp) du sommet au bas de versant de la colline Guéto

Cd est concentré du sommet au 1/3 supérieur du moyen versant, dans l'horizon humifère, tout comme Mn et Zn. Concernant Zn, il domine également dans la tranche humifère du profil de bas de versant. Ni semble plus concentré, dans l'horizon humifère, du sommet au bas versant ; toutefois, les teneurs dans les horizons humifère et non humifère du profil du moyen versant (G3 et G4) tendent à s'équilibrer.

Les horizons non humifères de type B, du sommet au 1/3 inférieur du moyen versant, sont riches en Fe. Au bas de versant, la teneur en Fe est importante dans la tranche d'horizon humifère. Quant au Pb, c'est seulement au niveau du moyen versant qu'il est plus concentré dans l'horizon humifère. Hormis cela, la dynamique du Pb est influencée par sa concentration, dans la tranche non humifère, des horizons du sommet au moyen versant, et du moyen versant au bas versant.

Pour Mo, du haut de versant au 1/3 inférieur du moyen versant, il est plus concentré dans la tranche humifère. Ti, quant à lui, domine dans la tranche humifère, du sommet au haut de versant ; ensuite, du 1/3 inférieur du moyen versant au bas de versant. Par contre, Sr est seulement dominant dans la tranche humifère, du sommet au haut versant et au bas versant. Pour Cr, c'est plutôt du sommet au haut versant et du 1/3 supérieur du moyen versant au 1/3 inférieur du moyen versant que sa teneur est importante dans la tranche humifère.

Enfin, Cu est mieux concentré dans les horizons de profondeur, du haut versant au tiers inférieur du moyen versant.

### **5.3.2.3. Étude corrélative entre les ETM, le pH, l'Eh et l'indice d'altération**

#### **5.3.2.3.1. Cas des sols du Blafo**

Les résultats des variables ETM, pH, Eh, CIA et STI des sols du Blafo, soumis au test de corrélation de Pearson, sont présentés dans les tableaux XXVIII à XXXI. Les différents coefficients obtenus, et pris en compte, sont présentés pour les variables dont les corrélations indiquent au moins une significativité à  $P < 0,05$ .

C'est ainsi qu'au niveau du profil de sommet (profil B1) (tableau XXVIII), plusieurs ETM sont corrélés entre eux, et présentent des niveaux de significativité très importants et différents. Ici, Mn est positivement corrélé au Cr (0,60\*), au Pb (0,78\*\*), au Fe (0,84\*\*\*) et au Zn (0,86\*\*\*) : il n'y a pas d'antagonisme entre Mn et ces éléments cités. Autrement dit,

dans le profil, lorsque la teneur en Mn augmente ou diminue, celle de ces éléments le sont aussi. Le même phénomène est observé entre Pb et Zn, Pb et Cd, Pb et Cr, Pb et Sr, Sr et Cr, Zn et Cr, Mo et Ti, Sr et Cd, corrélés, respectivement, à 0,64\*, 0,76\*\*, 0,79\*\*, 0,89\*\*\*, 0,75\*\*, 0,76\*\*, 0,73\*\* et à 0,89\*\*\*. Par contre, un antagonisme est observé entre Mo et Cd, entre Mo et Cu dont les coefficients respectifs sont -0,59\* et -0,73\*\*. Certains ETM sont corrélés avec le pH, l'Eh et les indices d'altération. Ainsi, une corrélation positive est établie entre le pH et les éléments Cr (0,58\*), Sr (0,66\*), Pb (0,82\*\*), Fe (0,71\*\*), Mn (0,96\*\*\*), Zn (0,82\*\*\*), entre le pH et le STI (0,73\*\*), entre le STI et Zn (0,61\*), Mn (0,65\*), Pb (0,94\*\*\*), Cd (0,83\*\*\*), Cr (0,84\*\*\*), Sr (0,96\*\*\*), entre le CIA et la Mo (0,66\*). En revanche, les corrélations négatives, expression d'un antagonisme entre certaines variables, apparaissent entre pH et CIA (-0,61\*), pH et Eh (-0,68\*), Eh et Ni (-0,67\*), Eh et Zn (-0,67\*), Eh et Mn (-0,67\*), CIA et Cr (-0,77\*\*), CIA et Cd (-0,86\*\*\*), CIA et Pb (-0,86\*\*\*), CIA et Sr (-0,92\*\*\*), et entre STI et CIA (-0,94\*\*\*).

Au niveau du profil de haut versant (profil B2), les différents coefficients (tableau XXIX) obtenus à partir du test de Pearson, soulignent une significativité négative entre Mo et les éléments Cd (-0,79\*\*\*), Pb (-0,70\*\*), Sr (-0,56\*), STI (-0,59\*), entre Ti et les éléments Cd (-0,61\*), Mn (-0,52\*), Pb (-0,78\*\*\*), entre Sr et le Ni (-0,61\*), entre pH et Cr (-0,73\*\*), entre pH et Eh (-0,99\*\*\*), entre CIA et les éléments Cd (-0,74\*\*), Pb (-0,73\*\*), Sr (-0,84\*\*\*), entre STI et Ni (-0,52\*) et CIA (-0,87\*\*\*). Cette significativité négative traduit un antagonisme, ou un phénomène selon lequel, lorsque la teneur d'un des éléments d'un couple corrélé diminue, celle de l'autre élément augmente, et vis-versa. Et, elle est hautement significative pour les variables Mo et Cd, Ti et Pb, Eh et pH, CIA et Sr, STI et CIA. Toutefois, il n'y a pas que la significativité négative qui est observée entre ces éléments cités. On y observe, en effet, une corrélation positive, et donc une dynamique d'évolution et de diminution dans le même sens, entre Mn et Fe (0,52\*), Pb et les éléments Cd (0,68\*\*), Mn (0,81\*\*\*), Sr (0,60\*), Zn (0,71\*\*), entre Ti et Cr (0,55\*), entre Ti et Mo (0,60\*), entre Zn et les éléments Cu (0,63\*) et Mn (0,88\*\*\*).

S'agissant du cas des horizons du profil de moyen versant (profil B3), indiqué au tableau XXX, on se rend bien compte de la significativité négative entre Mn et les éléments Cd (-0,76\*\*\*), Mo (-0,56\*), entre Zn et Cd (-0,78\*\*\*), Mo (-0,51\*), entre le pH et les éléments Cr (-0,68\*\*), Fe (-0,85\*\*\*), Ni (-0,62\*\*), Eh (-0,94\*\*\*).

Tableau XXVIII : Coefficients de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil B1

Variables	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn	pH	Eh	CIA	STI
Cd	1,00														
Cr	0,56	1,00													
Cu	0,02	0,45	1,00												
Fe	-0,03	0,33	-0,38	1,00											
Mn	0,26	<b>0,60*</b>	-0,06	<b>0,84***</b>	1,00										
Mo	<b>-0,59*</b>	-0,56	<b>-0,73**</b>	0,45	-0,02	1,00									
Ni	0,49	0,42	-0,31	0,20	0,02	0,11	1,00								
Pb	<b>0,76**</b>	<b>0,79**</b>	-0,08	0,54	<b>0,78**</b>	-0,33	0,45	1,00							
Sr	<b>0,89***</b>	<b>0,75**</b>	0,08	0,25	0,55	-0,55	0,44	<b>0,89***</b>	1,00						
Ti	-0,48	-0,19	-0,39	0,26	-0,24	<b>0,73**</b>	0,49	-0,31	-0,43	1,00					
Zn	0,18	<b>0,76**</b>	0,43	0,55	<b>0,86***</b>	-0,38	-0,17	<b>0,64*</b>	0,48	-0,39	1,00				
pH	0,41	<b>0,58*</b>	-0,04	<b>0,71**</b>	<b>0,96***</b>	-0,18	-0,04	<b>0,82**</b>	<b>0,66*</b>	-0,45	<b>0,82***</b>	1,00			
Eh	0,22	-0,05	-0,11	-0,45	<b>-0,67*</b>	0,00	<b>0,70*</b>	-0,18	0,02	0,50	<b>-0,67*</b>	<b>-0,68*</b>	1,00		
CIA	<b>-0,86***</b>	<b>-0,77**</b>	-0,16	-0,12	-0,49	<b>0,66*</b>	-0,37	<b>-0,86***</b>	<b>-0,92***</b>	0,51	-0,50	<b>-0,61*</b>	0,01	1,00	
STI	<b>0,83***</b>	<b>0,84***</b>	0,13	0,34	<b>0,65*</b>	-0,56	0,42	<b>0,94***</b>	<b>0,96***</b>	-0,44	<b>0,61*</b>	<b>0,73**</b>	-0,09	<b>-0,94***</b>	1,00

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

Tableau XXIX : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil B2

Variables	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn	pH	Eh	CIA	STI
Cd	1,00														
Cr	-0,02	1,00													
Cu	0,10	0,09	1,00												
Fe	-0,21	-0,29	-0,22	1,00											
Mn	0,45	-0,07	0,25	<b>0,52*</b>	1,00										
Mo	<b>-0,79***</b>	0,09	-0,33	0,05	-0,47	1,00									
Ni	-0,37	-0,20	0,20	0,07	0,32	0,31	1,00								
Pb	<b>0,68**</b>	-0,44	0,28	0,41	<b>0,81***</b>	<b>-0,70**</b>	0,02	1,00							
Sr	0,44	-0,41	0,17	0,36	0,20	<b>-0,56*</b>	<b>-0,61*</b>	<b>0,60*</b>	1,00						
Ti	<b>-0,61*</b>	<b>0,55*</b>	-0,47	0,09	<b>-0,52*</b>	<b>0,60*</b>	-0,28	<b>-0,78***</b>	-0,35	1,00					
Zn	0,27	0,01	<b>0,63*</b>	0,44	<b>0,88***</b>	-0,43	0,32	<b>0,71**</b>	0,25	-0,49	1,00				
pH	-0,23	<b>-0,73**</b>	0,09	-0,24	-0,51	0,18	0,14	-0,09	0,15	-0,34	-0,39	1,00			
Eh	0,13	<b>0,73**</b>	-0,14	0,29	0,47	-0,10	-0,12	0,03	-0,17	0,41	0,36	<b>-0,99***</b>	1,00		
CIA	<b>-0,74**</b>	0,45	-0,17	-0,06	-0,24	<b>0,75**</b>	<b>0,53*</b>	<b>-0,73**</b>	<b>-0,84***</b>	<b>0,61*</b>	-0,20	-0,21	0,28	1,00	
STI	<b>0,52*</b>	-0,49	0,07	0,42	0,34	<b>-0,59*</b>	<b>-0,52*</b>	<b>0,73**</b>	<b>0,92***</b>	-0,40	0,29	0,09	-0,13	<b>-0,87***</b>	1,00

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

Tableau XXX : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil B3

Variables	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn	pH	Eh	CIA	STI
Cd	1,00														
Cr	0,20	1,00													
Cu	-0,32	-0,13	1,00												
Fe	-0,37	<b>0,68**</b>	-0,30	1,00											
Mn	<b>-0,76***</b>	-0,09	0,39	0,29	1,00										
Mo	<b>0,75***</b>	0,29	-0,19	-0,28	<b>-0,56*</b>	1,00									
Ni	-0,42	<b>0,52*</b>	0,04	<b>0,63**</b>	<b>0,68**</b>	-0,27	1,00								
Pb	0,27	0,01	0,23	-0,31	0,17	0,37	0,36	1,00							
Sr	0,18	0,38	-0,11	0,27	-0,34	0,38	-0,01	0,15	1,00						
Ti	-0,40	-0,07	0,09	0,18	<b>0,67**</b>	-0,02	<b>0,55*</b>	<b>0,55*</b>	0,06	1,00					
Zn	<b>-0,78***</b>	0,10	<b>0,57*</b>	0,36	<b>0,94***</b>	<b>-0,51*</b>	<b>0,68**</b>	0,12	-0,22	<b>0,56*</b>	1,00				
pH	0,41	<b>-0,68**</b>	0,15	<b>-0,85***</b>	-0,17	0,31	<b>-0,62**</b>	0,26	-0,30	-0,03	-0,31	1,00			
Eh	-0,27	<b>0,77***</b>	-0,24	<b>0,88***</b>	0,11	-0,09	<b>0,66**</b>	-0,09	<b>0,47*</b>	0,17	0,24	<b>-0,94***</b>	1,00		
CIA	<b>-0,49*</b>	<b>0,64**</b>	-0,03	<b>0,88***</b>	<b>0,52*</b>	-0,39	<b>0,71**</b>	-0,33	-0,05	0,13	<b>0,61**</b>	<b>-0,75***</b>	<b>0,71***</b>	1,00	
STI	0,06	-0,44	-0,27	-0,23	<b>-0,51*</b>	0,07	<b>-0,82***</b>	<b>-0,67**</b>	0,10	-0,41	<b>-0,53*</b>	0,27	-0,33	-0,39	1,00

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

Tableau XXXI : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil B4

Variables	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn	pH	Eh	CIA	STI
Cd	1,00														
Cr	0,42	1,00													
Cu	0,12	0,38	1,00												
Fe	-0,40	<b>-0,73**</b>	0,07	1,00											
Mn	<b>-0,80***</b>	<b>-0,56*</b>	0,14	<b>0,78***</b>	1,00										
Mo	0,36	0,44	-0,08	-0,18	-0,40	1,00									
Ni	0,34	-0,41	0,33	<b>0,60*</b>	0,23	-0,18	1,00								
Pb	-0,21	-0,48	-0,04	<b>0,54*</b>	<b>0,60*</b>	-0,47	<b>0,57*</b>	1,00							
Sr	-0,25	0,27	0,12	-0,42	-0,01	-0,46	-0,47	-0,08	1,00						
Ti	0,15	0,37	<b>-0,56*</b>	-0,48	-0,36	0,44	-0,46	0,04	-0,02	1,00					
Zn	0,28	-0,25	<b>0,61*</b>	0,39	0,21	-0,48	<b>0,84***</b>	0,45	-0,12	<b>-0,69**</b>	1,00				
pH	0,09	0,15	-0,04	<b>-0,60*</b>	-0,45	-0,49	-0,36	-0,39	<b>0,54*</b>	-0,18	0,03	1,00			
Eh	-0,08	-0,13	0,04	<b>0,58*</b>	0,43	0,50	0,35	0,39	<b>-0,54*</b>	0,21	-0,04	<b>-1,00***</b>	1,00		
CIA	-0,48	-0,30	0,39	0,45	0,45	-0,11	0,05	-0,31	-0,07	<b>-0,80***</b>	0,19	0,03	-0,05	1,00	
STI	0,48	0,46	-0,30	-0,48	-0,46	0,31	-0,07	0,20	0,05	<b>0,81***</b>	-0,28	-0,15	0,18	<b>-0,89***</b>	1,00

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

Les mêmes phénomènes sont observés entre les indices d'altération CIA et le Cd (-0,49\*), STI et Mn (-0,51\*), STI et Pb (-0,67\*\*), STI et Zn (-0,53\*), STI et Ni (-0,82\*\*\*). Parallèlement, une significativité positive est observée entre Fe et Cr (0,68\*\*), entre Mo et Cd (0,75\*\*\*), entre Ni et les éléments Cr (0,52\*), Fe (0,63\*\*), Mn (0,68\*\*), entre Ti et les éléments Mn (0,67\*\*), Ni (0,55\*), Pb (0,55\*), Zn (0,56\*), entre Zn et les éléments Cu (0,57\*), Mn (0,94\*\*\*), Ni (0,68\*\*), entre Eh et les éléments Sr (0,47\*), Ni (0,66\*\*), Fe (0,88\*\*\*), Cr (0,77\*\*\*), entre l'indice d'altération CIA et les éléments Cr (0,64\*\*), Fe (0,88\*\*\*), Mn (0,52\*), Ni (0,71\*\*), Zn (0,61\*\*), Eh (0,71\*\*\*).

Enfin, au niveau du profil de bas de versant (profil B4), les coefficients issus du test de Pearson sont présentés dans le tableau XXXI. Sur ce tableau, on observe une significativité positive entre Ni et Fe (0,60\*), entre Pb et les éléments Fe (0,54\*), Mn (0,60\*), Ni (0,57\*), entre le Zn et le Cu (0,61\*), entre pH et Sr (0,54\*), entre Eh et Fe (0,58\*). De plus, une corrélation hautement significative existe entre Mn et Fe (0,78\*\*\*), Zn et Ni (0,84\*\*\*), STI et Ti (0,81\*\*\*). Cependant, des corrélations négatives existent dans le milieu, indiquant que les éléments évoluent inversement. Ainsi, on observe que Cr et Fe sont corrélés à -0,73\*\*, Mn et Cd à -0,80\*\*\*, Mn et Cr à -0,56\*, Ti et Cu à -0,56\*, Ti et Zn à -0,69\*\*. Les paramètres physico-chimiques Eh et pH sont hautement corrélés entre eux (-1,00\*\*\*), indiquant chacun une évolution contraire l'un de l'autre. L'on observe le même phénomène entre pH et Fe (-0,60\*), entre Eh et Sr (-0,54\*). Les indices d'altération (CIA et STI) sont corrélés entre eux, à hauteur de -0,89\*\*\*, et le CIA est corrélé avec Ti à -0,80\*\*\*.

### 5.3.2.3.2. Cas des sols du Guéto

Les corrélations entre les variables au Guéto, sont aussi nombreuses que celles établies au Blafo.

Ainsi, au sommet de la colline Guéto (tableau XXXII), les corrélations positives sont observées entre Cr et les éléments Cd (0,58\*), Mn (0,67\*\*), Zn (0,57\*), entre Mn et les éléments Ni (0,52\*), Cd (0,98\*\*\*), Ti (0,74\*\*), Sr (0,74\*\*), Zn (0,86\*\*\*), entre Ni et les éléments Cd (0,66\*\*), Sr (0,62\*), Ti (0,69\*\*), Zn (0,68\*\*), entre Zn et les éléments Cd (0,89\*\*\*), Cu (0,68\*\*), Sr (0,67\*\*), Ti (0,83\*\*\*), entre Sr et Cd (0,79\*\*\*), entre Ti et Cd (0,78\*\*\*). Tous ces éléments varient dans le même sens au niveau du profil du sommet. Par contre, une corrélation négative, très hautement significative, existe et entre Fe et les éléments Cd (-0,80\*\*\*), Cr (-0,85\*\*\*), Mn (-0,84\*\*\*). On a aussi, une corrélation négative, hautement

significative, entre Pb et Ni (-0,70\*\*), entre Pb et Sr (-0,75\*\*), entre Sr et Fe (-0,66\*\*), entre Zn et Fe (-0,74\*\*), entre Ti et Mo (-0,66\*\*). L'inter-relations entre les ETM, les paramètres physico-chimiques et l'indice d'altération est à noter au niveau de Fe et les éléments Eh (0,84\*\*\*), CIA (0,61\*), pH (-0,82\*\*\*), au niveau de l'Eh et les éléments Cd (-0,84\*\*\*), Cr (-0,57\*), Mn (-0,83\*\*\*), Ni (-0,58\*), Sr (-0,79\*\*\*). Dans ces conditions, Cd, Cr, Mn, Ni et Sr sont négativement liés à Eh. Ainsi, dans ce profil, une augmentation ou une diminution du potentiel redox (Eh) est contraire à la dynamique de ces éléments, ainsi qu'à une variation du pH.

Pour le profil du haut versant (tableau XXXIII), les corrélations positives concernent Cu et Cr (0,81\*\*\*), Mn et les éléments Cd (0,63\*), Mo (0,67\*\*), Zn (0,86\*\*\*), Ni et Fe (0,56\*), Sr et Pb (0,85\*\*\*), Ti et Mo (0,80\*\*\*). Par contre, les corrélations sont négatives entre Fe et les éléments Cd (-0,58\*), Mn (-0,66\*), Zn (-0,75\*), entre Ni et Mo (-0,56\*), entre Pb et Ni (-0,76\*\*), Cd (-0,66\*\*), entre Sr et Cd (-0,80\*\*\*), entre Sr et Mn (-0,68\*). Des corrélations entre les ETM et les autres paramètres, il ressort que, de façon positive, le pH et Fe, le pH et Ti, l'Eh et Cd, le CIA et Cd, le CIA et Mn, le CIA et Ti sont liés, respectivement, à 0,60\*, 0,60\*, 0,58\*, 0,52\*, 0,61\*, 0,61\*. Mais, de façon négative, une corrélation existe entre le pH et Cd (-0,57\*), entre le pH et l'Eh (-1,00\*\*\*), entre l'Eh et Cr (-0,52\*), entre l'Eh et les éléments Fe (-0,60\*) et Ti (-0,60\*), entre le CIA et Pb (-0,54\*), entre le CIA et Sr (-0,70\*\*). Tout comme dans le profil de sommet, le pH et le Eh, sont très significativement corrélés, de façon négative, indiquant ainsi des dynamiques contraires d'évolution.

Concernant le profil situé au 1/3 supérieur du moyen versant (profil G3), l'étude corrélatrice (tableau XXXIV) montre une significativité positive entre Cd et les éléments Cr (0,89\*\*\*), Mn (0,61\*), Mo (0,84\*\*\*), Pb (0,91\*\*\*). C'est aussi le cas entre Mn et Cr (0,82\*\*), Mo (0,79\*\*), Ni (0,87\*\*\*), Pb (0,62\*), Zn (0,91\*\*\*), entre Mo et Cr (0,79\*\*), Pb (0,67\*), Zn (0,71\*\*), entre Zn et Ni (0,78\*\*), Cr (0,76\*\*), entre Pb et Cr (0,90\*\*\*), Sr et Fe (0,79\*\*). La corrélation avec les paramètres physico-chimiques et l'indice d'altération est significativement positive entre le pH et Sr (0,85\*\*\*), entre l'Eh et les éléments Cd (0,78\*\*), Cr (0,90\*\*\*), Mn (0,79\*\*), Mo (0,64\*), Pb (0,88\*\*\*), Zn (0,59\*), entre le CIA et les éléments Mn (0,62\*), Ni (0,82\*\*), Eh (0,65\*). En revanche, et comme dans les autres profils déjà étudiés, la corrélation peut aussi être négative. C'est le cas ici, entre Cu et Cd (-0,61\*), entre Cu et Pb (-0,62\*), entre Sr et les éléments Cr (-0,63\*), Mn (-0,70\*), Ni (-0,73\*\*), Pb (-0,63\*), entre Ti et les éléments Mn (-0,76\*\*), Mo (-0,76\*\*), Ni (-0,62\*), Zn (-0,85\*\*).

Tableau XXXII : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil G1

Variables	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn	pH	Eh	CIA	STI
Cd	1,00														
Cr	<b>0,58*</b>	1,00													
Cu	0,30	0,41	1,00												
Fe	<b>-0,80***</b>	<b>-0,85***</b>	-0,41	1,00											
Mn	<b>0,98***</b>	<b>0,67**</b>	0,26	<b>-0,84***</b>	1,00										
Mo	-0,33	0,14	-0,12	0,12	-0,31	1,00									
Ni	<b>0,66**</b>	-0,04	0,39	-0,31	<b>0,52*</b>	-0,45	1,00								
Pb	-0,50	-0,04	-0,22	0,22	-0,36	-0,21	<b>-0,70**</b>	1,00							
Sr	<b>0,79***</b>	0,48	0,33	<b>-0,66**</b>	<b>0,74**</b>	-0,02	<b>0,62*</b>	<b>-0,75**</b>	1,00						
Ti	<b>0,78***</b>	0,16	0,33	-0,42	<b>0,74**</b>	<b>-0,66**</b>	<b>0,69**</b>	-0,22	0,37	1,00					
Zn	<b>0,89***</b>	<b>0,57*</b>	<b>0,68**</b>	<b>-0,74**</b>	<b>0,86***</b>	-0,40	<b>0,68**</b>	-0,40	<b>0,67**</b>	<b>0,83***</b>	1,00				
pH	<b>0,83***</b>	<b>0,54*</b>	0,18	<b>-0,82***</b>	<b>0,81***</b>	-0,33	<b>0,60*</b>	-0,44	<b>0,79***</b>	0,44	<b>0,65**</b>	1,00			
Eh	<b>-0,84***</b>	<b>-0,57*</b>	-0,17	<b>0,84***</b>	<b>-0,83***</b>	0,31	<b>-0,58*</b>	0,44	<b>-0,79***</b>	-0,45	<b>-0,65**</b>	<b>-1,00***</b>	1,00		
CIA	<b>-0,85***</b>	-0,35	-0,25	<b>0,61*</b>	<b>-0,78***</b>	0,34	<b>-0,83***</b>	<b>0,66**</b>	<b>-0,85***</b>	<b>-0,61*</b>	<b>-0,71**</b>	<b>-0,87***</b>	<b>0,86***</b>	1,00	
STI	<b>0,82***</b>	0,45	0,33	<b>-0,75**</b>	<b>0,75**</b>	-0,12	<b>0,72**</b>	<b>-0,73**</b>	<b>0,91***</b>	0,42	<b>0,69**</b>	<b>0,91***</b>	<b>-0,91***</b>	<b>-0,88***</b>	1,00

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

Tableau XXXIII : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil G2

Variables	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn	pH	Eh	CIA	STI
Cd	1,00														
Cr	-0,33	1,00													
Cu	-0,15	<b>0,81***</b>	1,00												
Fe	<b>-0,58*</b>	0,06	-0,07	1,00											
Mn	<b>0,63*</b>	-0,11	-0,06	<b>-0,66**</b>	1,00										
Mo	0,17	0,27	-0,05	-0,48	<b>0,67**</b>	1,00									
Ni	0,26	-0,28	-0,27	<b>0,56*</b>	-0,22	<b>-0,56*</b>	1,00								
Pb	<b>-0,66**</b>	0,38	0,14	-0,05	-0,35	0,32	<b>-0,76**</b>	1,00							
Sr	<b>-0,80***</b>	0,44	0,32	0,27	<b>-0,68**</b>	-0,09	-0,51	<b>0,85***</b>	1,00						
Ti	0,17	0,32	-0,16	-0,13	0,35	<b>0,80***</b>	-0,13	0,23	-0,12	1,00					
Zn	<b>0,53*</b>	0,12	0,37	<b>-0,75**</b>	<b>0,86***</b>	0,47	-0,41	-0,23	-0,46	0,05	1,00				
pH	<b>-0,57*</b>	0,51	0,01	<b>0,60*</b>	-0,26	0,32	0,07	0,37	0,36	<b>0,60*</b>	-0,47	1,00			
Eh	<b>0,58*</b>	<b>-0,52*</b>	-0,01	<b>-0,60*</b>	0,28	-0,32	-0,05	-0,40	-0,38	<b>-0,60*</b>	0,48	<b>-1,00***</b>	1,00		
CIA	<b>0,52*</b>	-0,07	-0,29	-0,01	<b>0,61*</b>	0,48	0,41	<b>-0,54*</b>	<b>-0,70**</b>	<b>0,61*</b>	0,24	0,30	-0,27	1,00	
STI	0,46	-0,51	-0,02	<b>-0,54*</b>	0,24	-0,35	-0,08	-0,37	-0,30	<b>-0,69**</b>	0,45	<b>-0,95***</b>	<b>0,95***</b>	-0,28	1,00

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

Tableau XXXIV : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil G3

Variables	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn	pH	Eh	CIA	STI
Cd	1,00														
Cr	<b>0,89***</b>	1,00													
Cu	<b>-0,61*</b>	-0,42	1,00												
Fe	0,02	-0,18	0,17	1,00											
Mn	<b>0,61*</b>	<b>0,82**</b>	-0,28	-0,18	1,00										
Mo	<b>0,84***</b>	<b>0,79**</b>	-0,52	0,25	<b>0,79*</b>	1,00									
Ni	0,16	0,48	-0,03	-0,37	<b>0,87***</b>	0,45	1,00								
Pb	<b>0,91***</b>	<b>0,90***</b>	<b>-0,62*</b>	-0,27	<b>0,62*</b>	<b>0,67*</b>	0,25	1,00							
Sr	-0,39	<b>-0,63*</b>	0,39	<b>0,79**</b>	<b>-0,70*</b>	-0,31	<b>-0,73**</b>	<b>-0,63*</b>	1,00						
Ti	-0,39	-0,49	-0,03	-0,45	<b>-0,76**</b>	<b>-0,76**</b>	<b>-0,62*</b>	-0,21	0,09	1,00					
Zn	0,50	<b>0,76**</b>	0,06	0,04	<b>0,91***</b>	<b>0,71**</b>	<b>0,78**</b>	0,47	-0,47	<b>-0,85**</b>	1,00				
pH	<b>-0,80**</b>	<b>-0,90***</b>	0,57	0,53	<b>-0,77**</b>	<b>-0,64*</b>	-0,54	<b>-0,90***</b>	<b>0,85***</b>	0,24	-0,57	1,00			
Eh	<b>0,78**</b>	<b>0,90***</b>	-0,56	-0,54	<b>0,79**</b>	<b>0,64*</b>	0,57	<b>0,88***</b>	<b>-0,86***</b>	-0,26	<b>0,59*</b>	<b>-1,00***</b>	1,00		
CIA	0,06	0,41	-0,11	<b>-0,79**</b>	<b>0,62*</b>	0,13	<b>0,82**</b>	0,30	<b>-0,88***</b>	-0,10	0,46	<b>-0,63*</b>	<b>0,65*</b>	1,00	
STI	-0,05	-0,09	0,07	<b>0,58*</b>	0,13	0,30	0,14	-0,17	0,24	-0,48	0,24	0,27	-0,27	-0,26	1,00

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

Avec les autres paramètres, la corrélation est négative entre le pH et les éléments Cd (-0,80\*\*), Cr (-0,90\*\*\*), Mn (-0,77\*\*), Mo (-0,64\*), Pb (-0,90\*\*\*), Eh (-1,00\*\*\*), entre le CIA et les éléments Fe (-0,79\*\*), Sr (-0,88\*\*\*), et pH (-0,63\*).

Pour le 1/3 inférieur du moyen versant, on admet, comme nous l'indique les coefficients du tableau XXXV, que, Ni et les éléments Fe, Mn, Mo, Sr et Zn sont positivement corrélés, respectivement, à 0,87\*\*\*, 0,87\*\*\*, 0,86\*\*\*, 0,78\*\*, 0,83\*\*\*. Cette corrélation positive est aussi observée entre Mn et les éléments Fe (0,99\*\*\*), Mo (0,58\*), Sr (0,83\*\*\*), Zn (0,96\*\*\*), entre Sr et les éléments Mo (0,65\*), Fe (0,81\*\*), Zn (0,80), entre Pb et Cd (0,87\*\*\*), Ti (0,71\*\*), entre Zn et les éléments Cu (0,63\*), Fe (0,93\*\*\*), Mo (0,58\*). La corrélation est négative entre Pb et les éléments Mo (-0,81\*\*), Ni (-0,74\*\*), Sr (-0,80\*\*), entre Ti et les éléments Fe (-0,77\*\*), Mn (-0,79\*\*), Ni (-0,59\*), Sr (-0,87\*\*\*), Zn (-0,70\*). Avec les paramètres physico-chimiques et l'indice d'altération, le pH est négativement corrélé avec Fe (-0,59\*), Ni (-0,61\*), Zn (-0,66\*), Eh (-0,97\*\*\*). C'est aussi le cas entre CIA et Fe (-0,60\*), Mn (-0,64\*), Sr (-0,80\*). Par contre, le CIA est corrélé positivement au Pb (0,81\*\*), au Ti (0,92\*\*\*).

Pour le cas du bas de versant, les coefficients (tableau XXXVI) indiquent que Mn est positivement corrélé avec Fe (0,96\*\*), Ni (1,00\*\*\*), Eh (1,00\*\*\*). Il existe aussi, une corrélation positive entre Zn et Cu (0,86\*), entre Zn et Fe (0,82\*), entre Mo et Cd (0,90\*\*\*), entre le pH et les éléments Cd (0,9\*\*), Mo (0,99\*\*\*), CIA (0,91\*). Le potentiel redox (Eh) est corrélé avec Fe (0,96\*\*), Mn (1,00\*\*\*), Ni (0,99\*\*\*). Pour les corrélations négatives, elles s'observent pour Cd et les éléments Fe (-1,00\*\*), Mn (-1,00\*\*), Ni (-1,00\*\*), Mo et les éléments Mn (-0,9\*\*), Fe (-0,87\*), Ni (-0,94\*\*). C'est aussi le cas pour le pH et les éléments Fe (-0,85\*), Mn (-1,00\*\*), Ni (-0,94\*\*), Eh (-0,95\*\*), le Eh et les éléments Cd (-1,00\*\*\*), Mo (-0,94\*\*), CIA (-1,00\*\*\*), le CIA et les éléments Fe (-0,94\*\*), Mn (-1,00\*\*\*), Ni (-0,96\*\*).

#### **5.3.2.4. Principaux facteurs corrélatifs entre les variables étudiés**

Les données analytiques des ETM des paramètres physico-chimiques (pH et Eh), ainsi que celles de l'indice d'altération (CIA) ont été soumises à une analyse en composante principale (ACP) pour définir les facteurs principaux, dont la corrélation avec les variables permettra une explication des phénomènes mis en jeu. Les résultats sont exprimés par site et par segment topographique.

Tableau XXXV : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil G4

Variables	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn	pH	Eh	CIA	STI
Cd	1,00														
Cr	-0,53	1,00													
Cu	0,00	0,04	1,00												
Fe	-0,11	-0,52	0,37	1,00											
Mn	-0,14	-0,50	0,42	<b>0,99***</b>	1,00										
Mo	<b>-0,75**</b>	0,35	0,27	0,54	<b>0,58*</b>	1,00									
Ni	-0,49	-0,09	0,25	<b>0,87***</b>	<b>0,87***</b>	<b>0,86***</b>	1,00								
Pb	<b>0,87***</b>	-0,11	-0,18	-0,53	-0,57	<b>-0,81**</b>	<b>-0,74**</b>	1,00							
Sr	-0,47	-0,24	0,49	<b>0,81**</b>	<b>0,83***</b>	<b>0,65*</b>	<b>0,78**</b>	<b>-0,80**</b>	1,00						
Ti	0,31	0,55	-0,33	<b>-0,77**</b>	<b>-0,79**</b>	-0,38	<b>-0,59*</b>	<b>0,71**</b>	<b>-0,87***</b>	1,00					
Zn	-0,09	-0,38	<b>0,63*</b>	<b>0,93***</b>	<b>0,96***</b>	<b>0,58*</b>	<b>0,83***</b>	-0,50	<b>0,80**</b>	<b>-0,70*</b>	1,00				
pH	-0,21	0,05	-0,35	<b>-0,59*</b>	-0,57	-0,42	<b>-0,61*</b>	-0,04	-0,23	-0,04	<b>-0,66*</b>	1,00			
Eh	0,38	-0,11	0,27	0,47	0,45	0,24	0,45	0,23	0,08	0,17	0,54	<b>-0,97***</b>	1,00		
CIA	0,51	0,35	-0,27	<b>-0,60*</b>	<b>-0,64*</b>	-0,42	-0,54	<b>0,81**</b>	<b>-0,80**</b>	<b>0,92***</b>	-0,55	-0,19	0,35	1,00	
STI	<b>-0,78**</b>	0,23	-0,25	-0,18	-0,14	0,25	0,03	<b>-0,66*</b>	0,22	-0,33	-0,25	<b>0,73**</b>	<b>-0,83***</b>	-0,57	1,00

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

Tableau XXXVI : Coefficient de corrélation entre les ETM dosés, le pH, l'Eh et les indices d'altération des horizons du profil G5

Variables	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn	pH	Eh	CIA	STI
Cd	1,0														
Cr	0,6	1,00													
Cu	-0,3	0,45	1,00												
Fe	<b>-1,0**</b>	-0,49	0,45	1,00											
Mn	<b>-1,0***</b>	-0,66	0,31	<b>0,96**</b>	1,0										
Mo	<b>0,9**</b>	0,62	-0,37	<b>-0,87*</b>	<b>-0,9**</b>	1,00									
Ni	<b>-1,0***</b>	-0,57	0,41	<b>0,98***</b>	<b>1,0***</b>	<b>-0,94**</b>	1,00								
Pb	-0,4	-0,41	-0,41	0,35	0,4	-0,19	0,34	1,00							
Sr	-0,3	0,02	0,45	0,52	0,3	-0,18	0,34	-0,11	1,00						
Ti	-0,5	-0,58	-0,19	0,36	0,6	-0,59	0,53	0,52	-0,60	1,00					
Zn	-0,8	-0,01	<b>0,86*</b>	<b>0,82*</b>	0,7	-0,76	0,81	-0,03	0,43	0,21	1,00				
pH	<b>0,9**</b>	0,72	-0,26	<b>-0,85*</b>	<b>-1,0**</b>	<b>0,99***</b>	<b>-0,94**</b>	-0,23	-0,13	-0,66	-0,68	1,00			
Eh	<b>-1,0***</b>	-0,66	0,32	<b>0,96**</b>	<b>1,0***</b>	<b>-0,94**</b>	<b>0,99***</b>	0,35	0,33	0,55	0,74	<b>-0,95**</b>	1,0		
CIA	<b>1,0***</b>	0,72	-0,17	<b>-0,94**</b>	<b>-1,0***</b>	<b>0,88*</b>	<b>-0,96**</b>	-0,51	-0,31	-0,58	-0,64	<b>0,91*</b>	<b>-1,0***</b>	1,00	
STI	-0,8	<b>-0,89*</b>	-0,07	0,63	0,8	-0,78	0,72	0,07	0,12	0,52	0,32	<b>-0,86*</b>	0,8	-0,77	1,00

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

#### 5.3.2.4.1. Cas des sols du Blafo

L'analyse en composante principale (ACP), appliquée aux échantillons de sols du profil de sommet (B1), au Blafo, est rapportée par la figure 63. Les trois facteurs principaux expriment 89,62%, et sont, respectivement, pour F1 (47,83%), F2 (21,98%), F3 (19,81%). L'analyse du plan factoriel F1-F2 dégage trois groupes de variables par cercles de communautés. Le premier groupe, composé de Cd, Sr, Cr et Pb, et le deuxième groupe composé de Zn, pH et Mn, se situent dans la partie positive de l'axe du facteur F1, tandis que le troisième groupe, composé de Mo et du CIA, est du côté de l'axe négatif. Pour le plan factoriel F1-F3, on a deux regroupements. Il s'agit d'un regroupement prenant en compte les variables des groupes 1 et 2 du plan factoriel F1-F2, et du groupe composé de Mo et de Ti.

La figure 64 représente l'ACP au niveau des sols du haut de versant (B2) au Blafo. Les valeurs des facteurs sont de 38,10%, pour F1, 24,06%, pour F2 et 16,81% pour F3. Trois groupes se dégagent des cercles de communautés du plan factoriel F1-F2, et deux de ces trois groupes se retrouvent dans le plan factoriel F1-F3. Le premier groupe est composé de Pb, Mn, Zn, Cd, Sr, situé du côté positif de l'axe du facteur F1. Au contraire, le deuxième groupe se retrouve du côté de l'axe négatif, et comprend Mo, Ti et CIA. Pour le troisième groupe, exprimé seulement sur le plan factoriel F1-F2, il comprend Cr et Eh, et est fonction du facteur F2.

L'analyse des cercles de communautés obtenus après l'ACP sur les variables du profil de moyen versant (B3) (figure 65) montre trois types de regroupement, sur le plan factoriel F1-F2, et deux types, sur le plan F1-F3. Les pourcentages d'expression sont de 40,99%, pour le facteur F1, 24,72%, pour le facteur F2 et 15,18%, pour le facteur F3. Ainsi, au niveau du plan factoriel F1-F2, on a le premier groupe composé de Ni, Fe, Cr, CIA, Eh, et, le deuxième groupe, comprenant Mn et Zn. Ces deux groupes sont tous situés du côté négatif de l'axe du facteur F1 et, sont donc gouvernés par le même phénomène. En revanche, le troisième groupe de ce plan factoriel se trouve du côté positif de l'axe, et, est constitué de Mo et Cd. Concernant les cercles de communautés du plan factoriel F1-F3, ils sont de deux types. Le premier type n'est constitué que des éléments du groupe 1 et 2 du plan factoriel F1-F2, et est situé du côté négatif de l'axe F1 : c'est la preuve que ces éléments sont fortement liés par un même phénomène. Le deuxième type est constitué du Cd et du pH, et est situé du côté positif de l'axe du facteur F1.

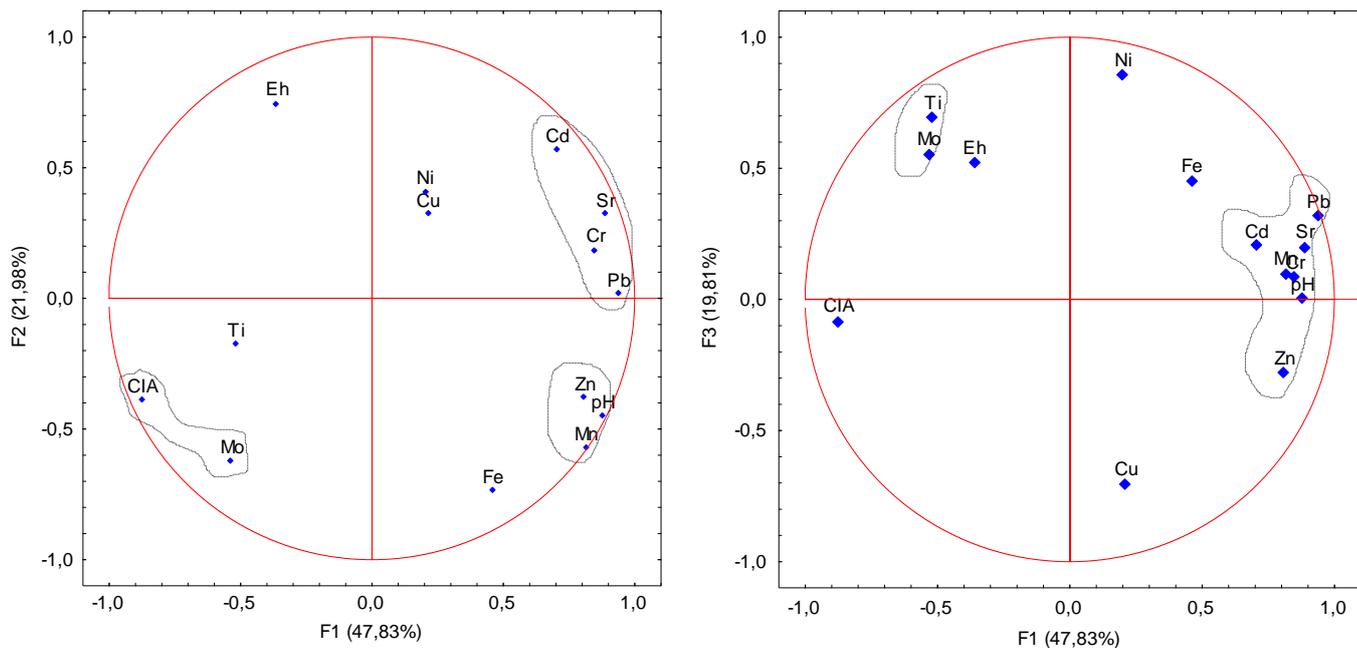


Figure 63 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil B1

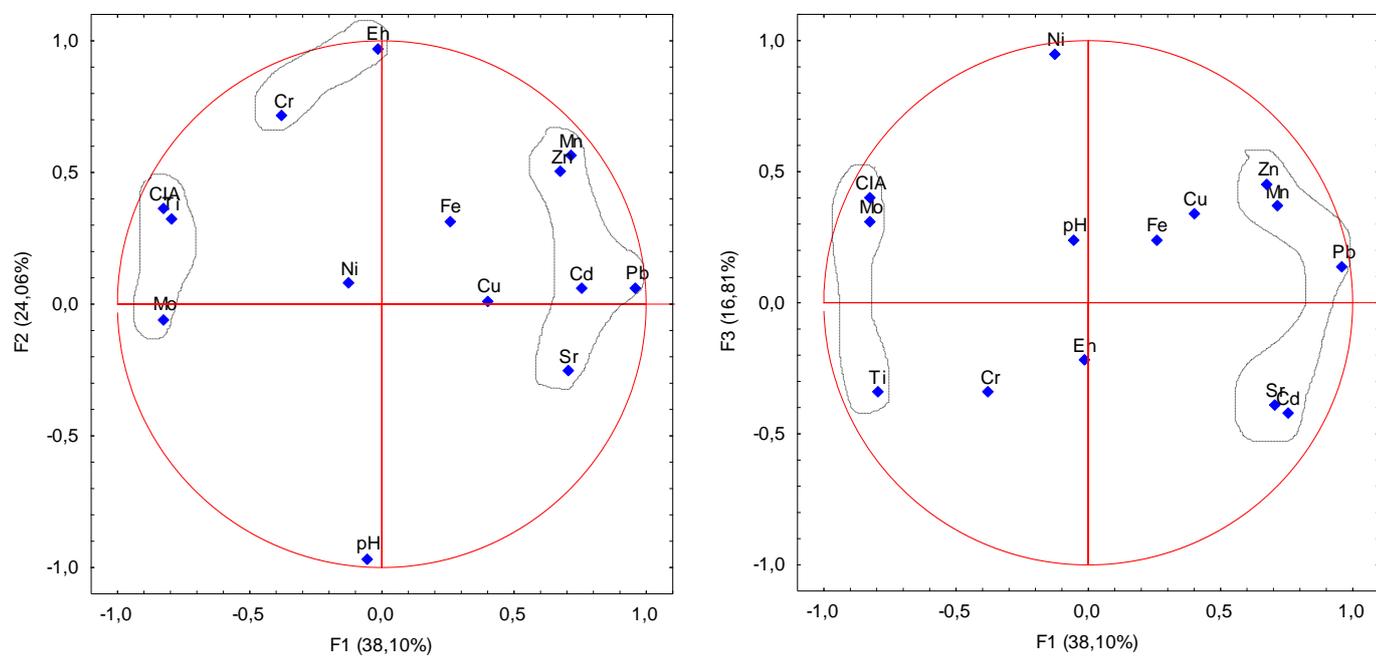


Figure 64 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil B2

Les données du profil du bas versant (B4), de la figure 66, montrent les différents cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3. Ici, la somme des trois facteurs est de 74,78%, avec, respectivement, pour F1, F2 et F3, les valeurs 34,54%, 22,88% et 17,36%. Trois ensembles se dégagent, avec un groupe commun aux deux plans factoriels. Le groupe commun se compose de Ni, Mn, Pb, Fe, Zn, et est situé sur chacun des plans factoriels, du côté positif de l'axe F1. Pour les deux autres ensembles, on a Ti et Mo, Sr et pH qui, d'ailleurs, sont corrélés par rapport au facteur F2. Ils sont diamétralement opposés et sont gouvernés par des phénomènes contraires. Ti et Mo sont du côté de l'axe positif du facteur F2, tandis que Sr et pH sont du côté négatif.

Certaines variables expriment leur degré de corrélation avec des facteurs, tout en étant isolés. D'autres sont diamétralement opposés, et affichent un antagonisme avéré. C'est le cas du pH et du Eh qui, sur toutes les figures présentées, sont toujours situés de part et d'autre d'un facteur, notamment, le facteur F1. Un autre fait, est le cas de Cu, qui semble afficher un tout autre caractère : il n'est corrélé ni gouverné par aucun phénomène avec les autres variables ; il semble totalement isolé.

#### **5.3.2.4.2. Cas des sols du Guéto**

À la figure 67, on distingue l'interaction géochimique entre les divers variables du profil de sommet G1, au Guéto, à l'aide de l'ACP réalisée. Deux groupes se dégagent des cercles de communautés, sur l'ensemble des plans factoriels F1-F2 et F1-F3. Et, les taux expressifs des facteurs sont de 60,54%, pour F1, 13,35% pour F2 et 11,41%, pour F3. Le premier groupe, situé du côté de l'axe positif du facteur F1 est composé de Cr, Ti, Ni, Zn, Cd, Mn, Sr et pH et, le deuxième groupe est du côté négatif et comprend Fe, Eh et CIA.

Concernant les données du profil G2, soumises à l'ACP (figure 68), divers regroupements se dégagent. Sur le plan factoriel F1-F2, Cd, Mn, Zn, CIA, Eh, constituent un premier ensemble, situé du côté positif de l'axe du facteur F1. Le deuxième ensemble comprend Fe, Pb, Sr et pH, diamétralement opposés au premier ensemble. Quant au troisième ensemble, il s'apparente à l'axe négatif du facteur F2 et comprend Mo et Ti. Les cercles de communautés du plan F1-F3 sont au nombre de quatre, dont une communauté est la même que la première communauté du plan F1-F2. On a, à ce niveau, les communautés Sr-Pb, Fe-pH, tous situées du côté négatif de l'axe du facteur F1. On note aussi que, la communauté Ni-CIA est située du côté négatif de l'axe du facteur F3.

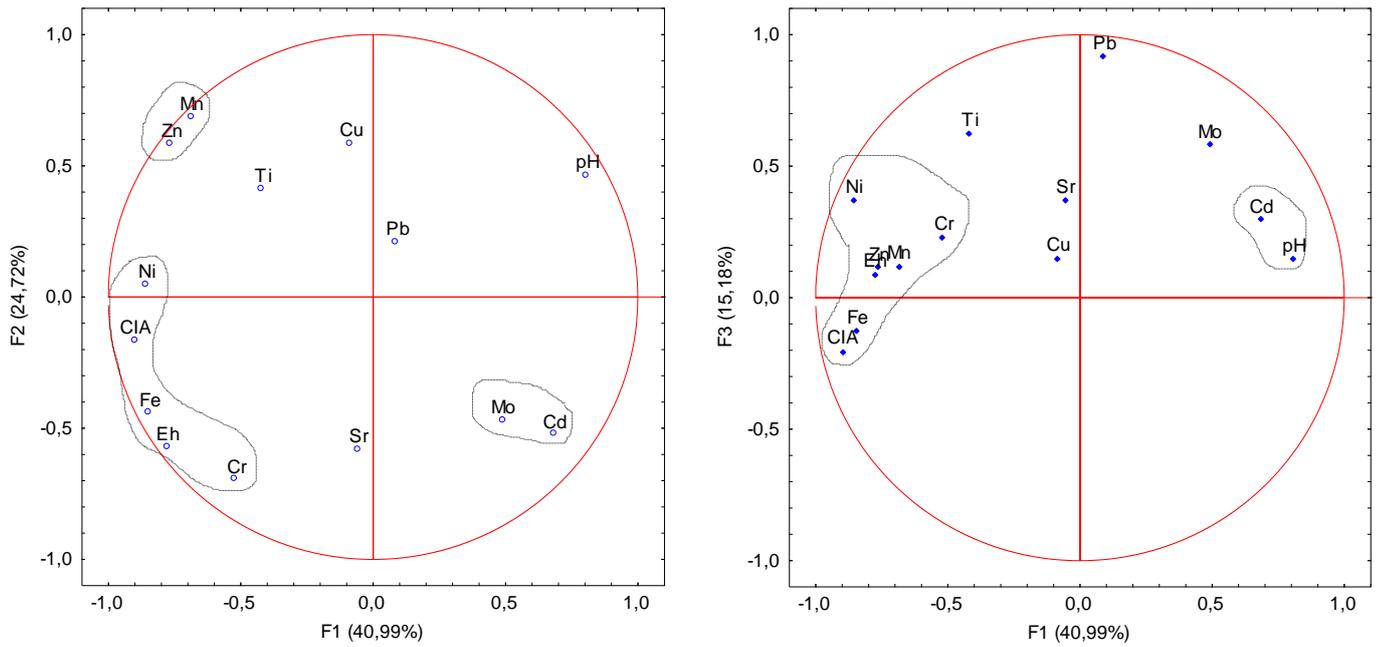


Figure 65 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil B3

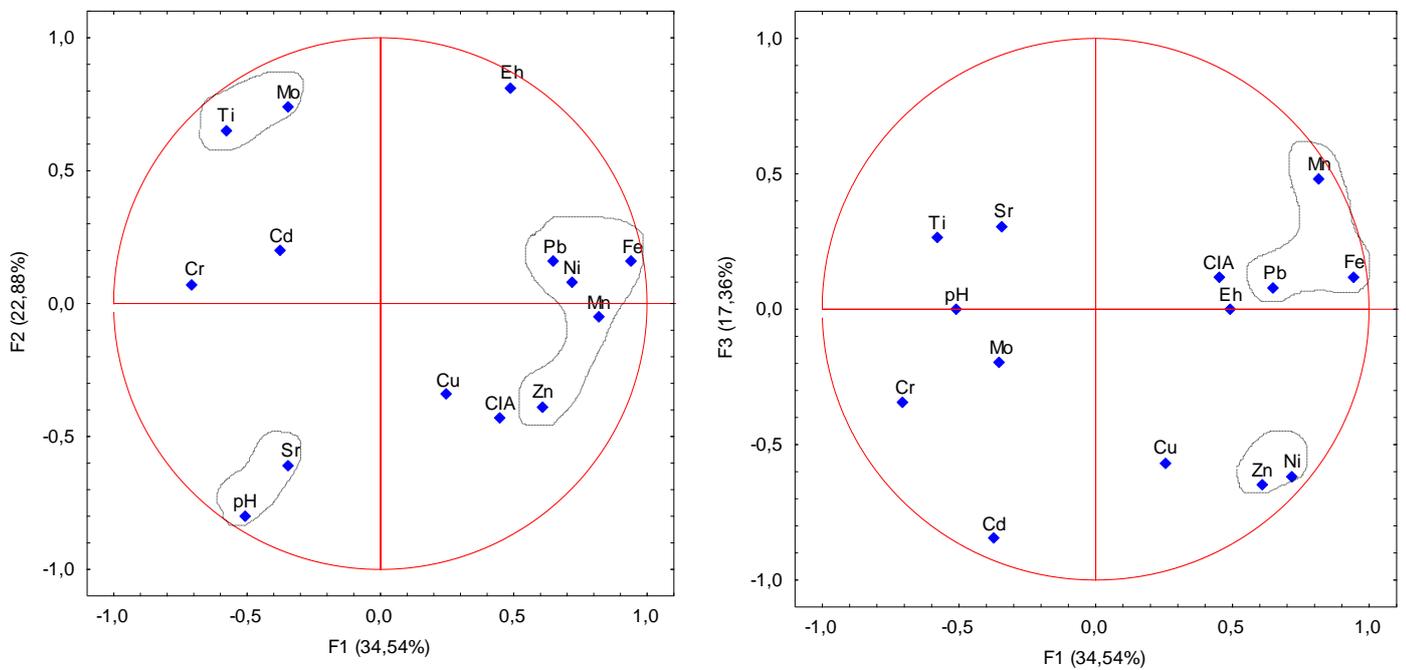


Figure 66 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil B4

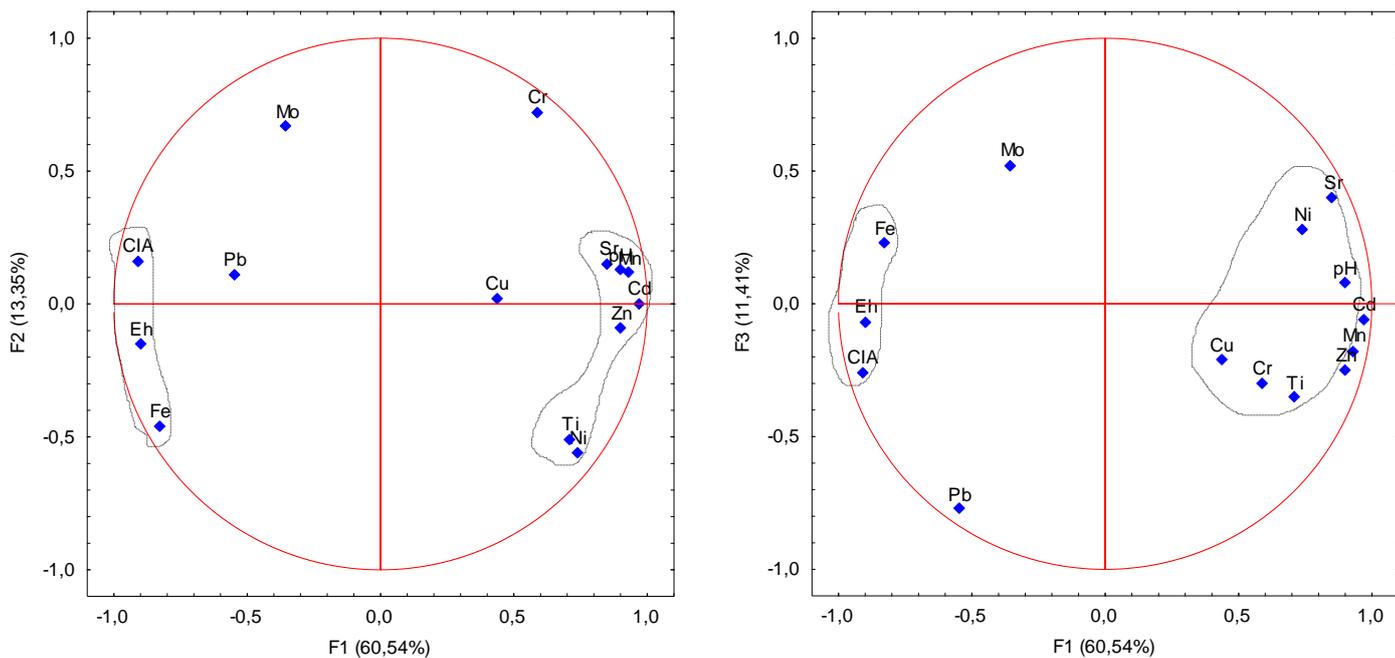


Figure 67 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil G1

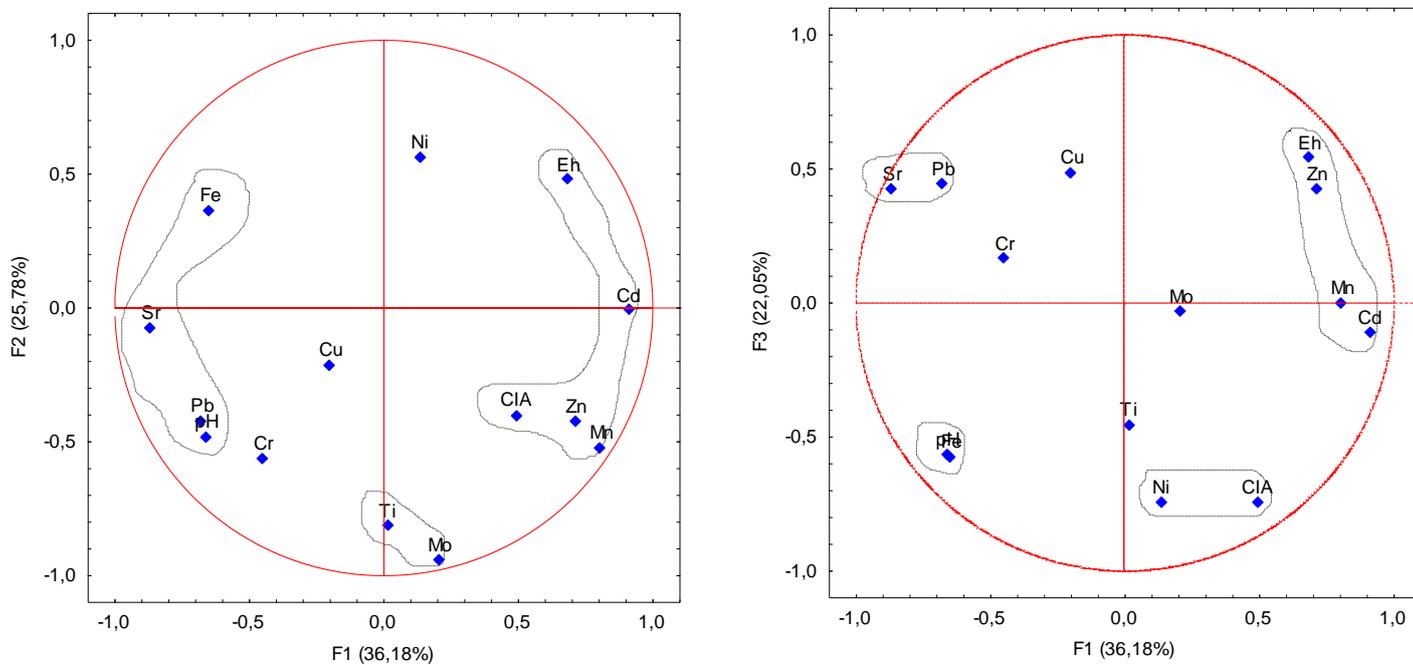


Figure 68 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil G2

Pour le profil G3, les cercles de communautés (figure 69) sont au nombre de deux, et identiques sur l'ensemble des plans factoriels. La première communauté, composée de Cd, Cr, Mn, Zn, Mo, Ni, Eh, CIA, est située du côté négatif de l'axe du facteur F1, tandis que la seconde communauté (Sr et pH) se retrouve du côté positif.

Au niveau du profil G4, l'ACP (figure 70) indique, comme au G3, deux cercles de communautés sur l'ensemble des trois facteurs. Le premier cercle, situé du côté de l'axe positif du facteur F1, comprend Zn, Fe, Mn, Mo, Sr, Ni, et le deuxième cercle, composé de Pb, Cd, Ti, CIA, est du côté négatif de l'axe du facteur F1.

Pour le profil de bas versant (G5) (figure 71), deux familles opposées se distinguent. Il y'a celle composée de Cd, Mo, pH, CIA, située du côté positif de l'axe du facteur F1, et celle composée de Fe, Ni, Mn, Eh, située du côté négatif. De plus, Zn s'ajoute à la famille située du côté négatif, et Cr, du côté positif, lorsqu'on passe au plan factoriel F1-F3.

Tout comme dans le cas des sols du Blafo, le pH et l'Eh sont diamétralement opposés sur les différentes figures, et, donc très fortement antagonistes.

### **Conclusion partielle**

Dans ce chapitre, ont été présentés les résultats des analyses géochimiques effectuées au MEB et au spectromètre d'absorption atomique, ceux de la description macromorphologique des sols au Blafo et au Guéto ainsi que les résultats de la détermination du fond pédogéochimique des sols décrits. À travers les résultats rapportés, l'on a pu : fournir des renseignements sur le niveau d'altération des roches et des sols ; identifier le type de sédiment, à l'origine, qui, par la suite a été métamorphisé ; déterminer le type de sols (cambisols) ; dégager les différents teneurs ETM ; et apprécier leurs inter-relations.

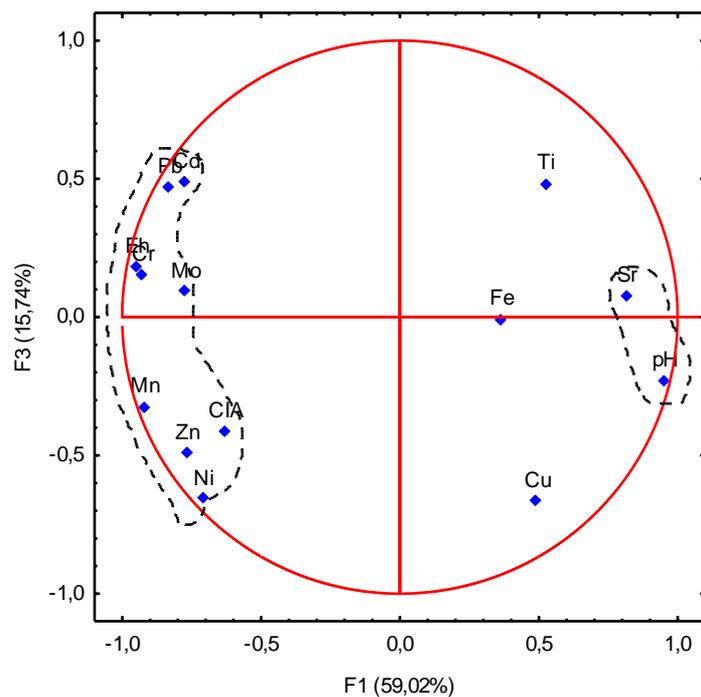
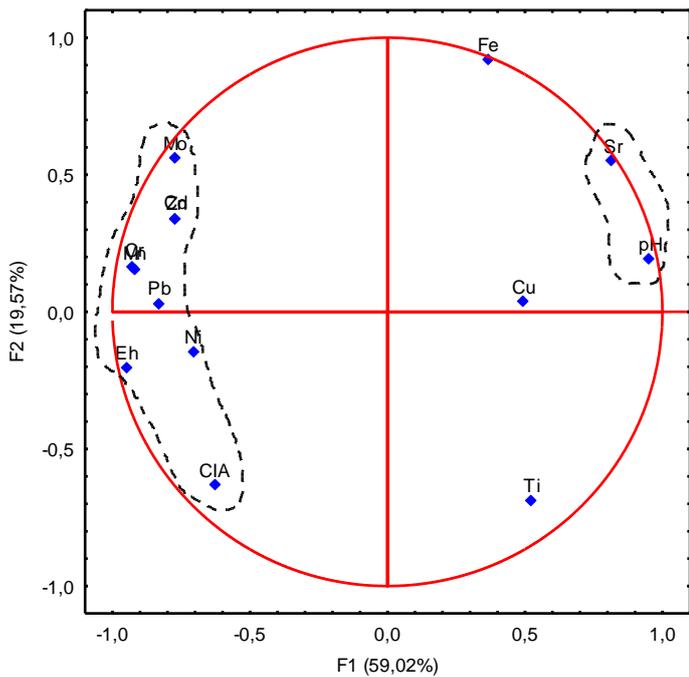


Figure 69 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil G3

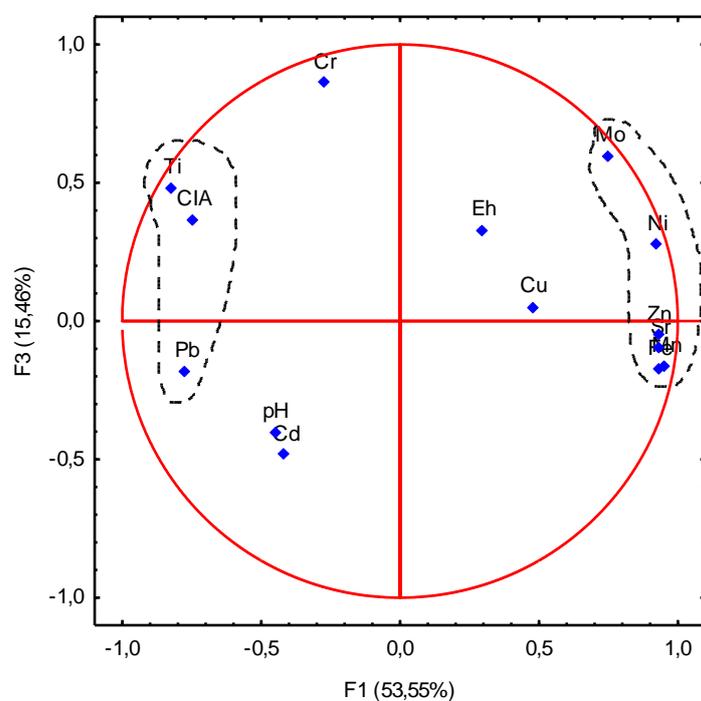
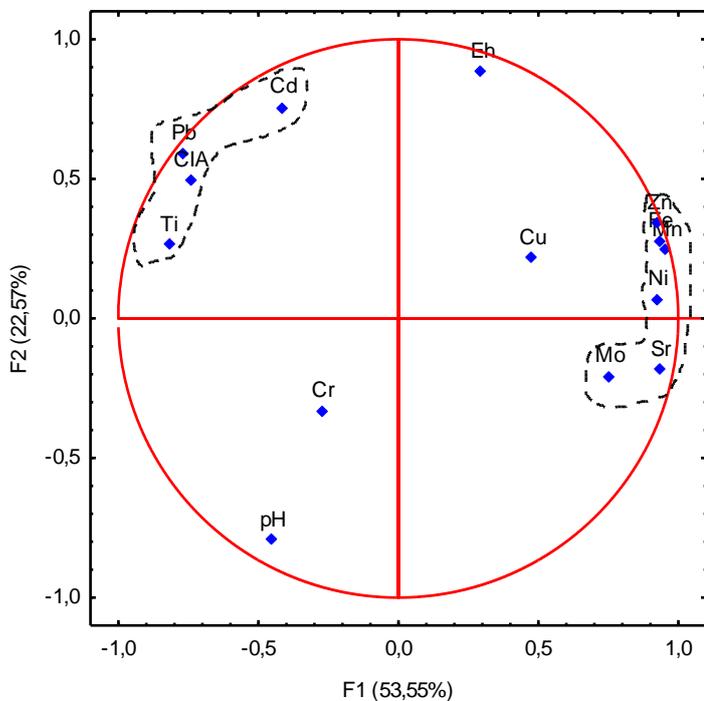


Figure 70 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil G4

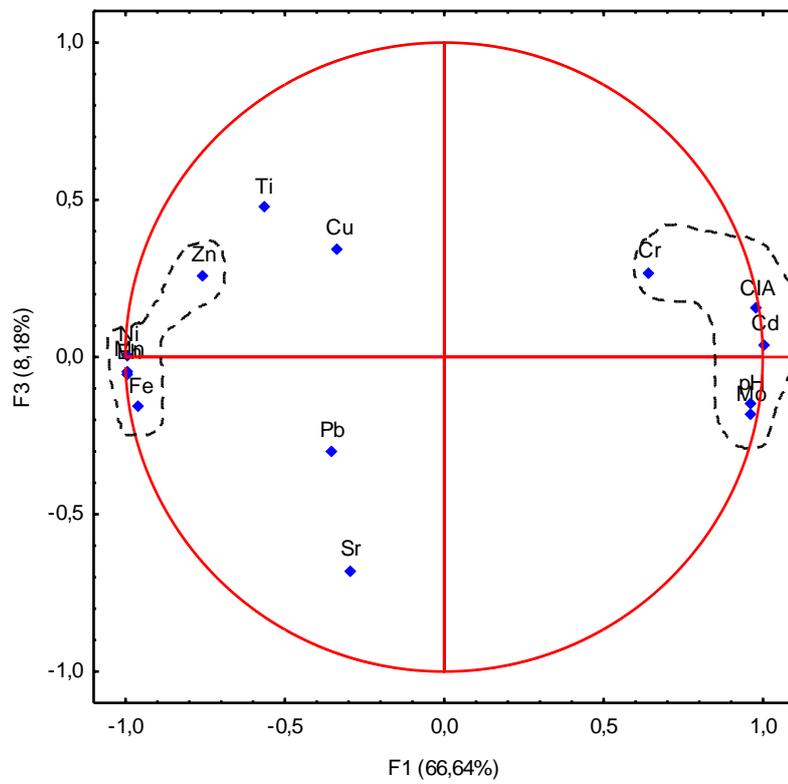
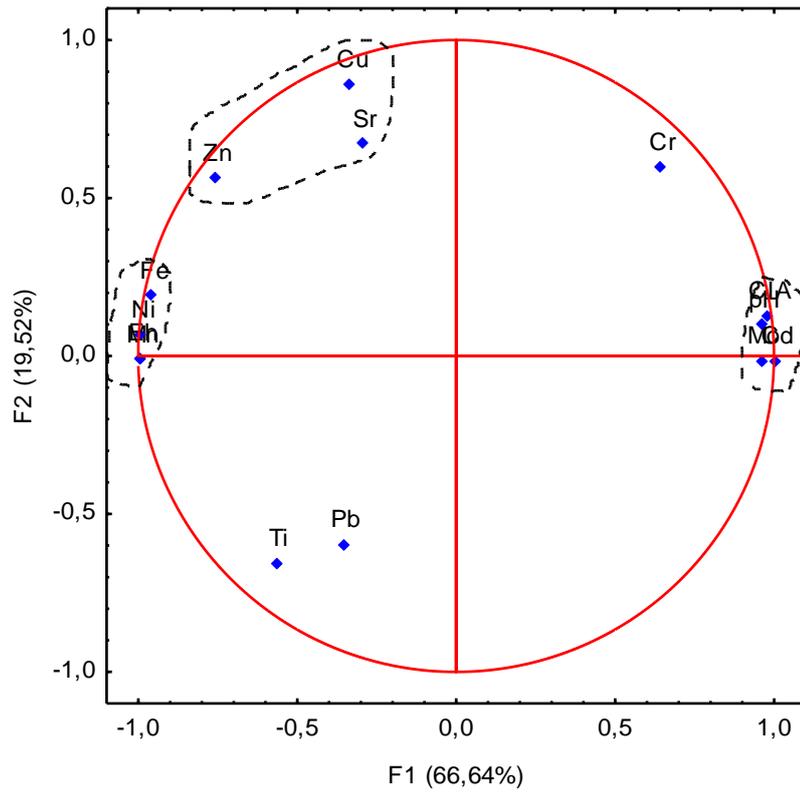


Figure 71 : Cercles de communautés des plans factoriels F1-F2 et F1-F3 du profil G5

## CHAPITRE VI : INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSION

### Introduction

L'objet de ce chapitre est d'analyser les résultats obtenus, de les comparer et les discuter avec des travaux conduits antérieurement par d'autres chercheurs.

### 6.1. Informations sur les formations géologiques étudiées

Les formations géologiques observées au cours de l'investigation pédologique sur le périmètre étudié au Blafo-Guétó, sont toutes métamorphosées et très fortement altérées. En effet, les concentrations en oxydes majeurs des quatre (4) roches analysées expriment des tendances où les alcalins ont un comportement anomal. Les teneurs en alcalins ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ), qui varient de 0,74 % à 5,26 %, parfois nulles, ont permis, à l'issue de la soumission des échantillons de roches au diagramme de Hugues (1973) de se situer dans le champ des roches altérées.

De façon macroscopique et, même après observation des échantillons au microscope optique ou au microscope électronique à balayage, il a été établi que ces échantillons sont des métasédiments. La détermination de la nature initiale de ces sédiments qui, par la suite, ont été métamorphosés et altérés, s'est faite sur la base de critères géochimiques couramment utilisés pour la classification des sédiments. Ainsi, l'origine sédimentaire des roches a été déterminée, avec l'échantillon R1, représentatif des grauwackes, l'échantillon R3, constituant une litharénite et l'échantillon R4, une sublitharenite. Pour l'échantillon R2, il est proche de l'échantillon R3.

De ce qui précède, il est judicieux d'utiliser les résultats des compositions chimiques pour établir ou déterminer des environnements de formation ou de dépôt. Ce constat s'inscrit dans le même sens que celui de différents auteurs (Bhatia, 1983 ; Bhatia et Crook, 1986 ; Roser et Korsch, 1986 ; 1988 ; Maslov *et al.*, 2003 ; 2008 ; Astakhov *et al.*, 2013 ; Smirnova *et al.*, 2013), qui ont indiqué que les caractéristiques chimiques des sédiments permettent de déterminer les environnements anciens (faciès, géodynamique, climatique) des formations.

Par ailleurs, les substances inorganiques ont une place importante parmi les substances chimiques naturellement présentes, aussi bien dans les sols que dans les roches. Pour cela, leur évaluation dans les échantillons étudiés s'est avérée importante. Ainsi, le dosage de certains métaux et métalloïdes, regroupés sous le terme d'ETM, indique des teneurs qui ne

sont pas au-delà des teneurs naturelles de ces éléments. À preuve, pour les quatre (4) échantillons de roches analysés, toutes les valeurs en mercure (Hg) sont inférieures à la limite de détection. Cette situation du mercure peut s'expliquer par sa forte volatilité, surtout qu'il est moyennement abondant dans la croûte terrestre, d'environ  $0,05 \text{ mg.kg}^{-1}$  selon PNUÉ (2002), et  $0,085 \text{ mg.kg}^{-1}$  selon Pereck (2013), et que les roches analysées sont métamorphosées et altérées. Les valeurs du chrome (Cr) dans les échantillons, sont entre 49,8 et  $59,31 \text{ mg.kg}^{-1}$ , alors que, tel qu'indiqué par INERIS (2006), les teneurs moyennes dans la croûte terrestre seraient comprises entre 100 et  $200 \text{ mg.kg}^{-1}$  et, les roches les plus riches, seraient les ultrabasiques.

Pour le cadmium, comme l'affirme Baize (1997), il serait présent dans toutes les roches, mais de façon prépondérante dans les roches sédimentaires et, plus particulièrement, dans celles riches en carbone, sulfures et phosphates. Il est présent dans la croûte terrestre à des concentrations d'environ 1 à  $2 \text{ mg.kg}^{-1}$ , avec une abondance moyenne estimée à  $1,1 \text{ mg.kg}^{-1}$ , selon Pereck (2013). Dans le cas de la présente étude, certaines teneurs ont atteint  $2,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ , ce qui ne constitue vraiment pas une grande anomalie géochimique, puisque toutes les roches analysées sont d'origine sédimentaire et, donc, le fruit d'une accumulation d'éléments d'origines ou d'époques diverses. Le cadmium (Cd) est un élément relativement rare, toujours associé à d'autres éléments et, n'existe donc pas naturellement à l'état natif, mais en combinaison ou en association avec le zinc ou le plomb. Il est, comme nous l'avons constaté dans les analyses réalisées, en rapport, pas inverse, mais concordant, avec Zn et Pb. En effet, la remarque est que, dans le cas des échantillons analysés, lorsque le taux d'un échantillon en Cd est élevé par rapport à un autre échantillon, les teneurs en Zn et Pb, le sont également. Et, même si tel est le cas, les teneurs en Zn et Pb dosées, ne dépassent pas les teneurs naturellement indiquées pour les roches. Selon (Davies et Jones, 1988), la teneur moyenne en Zn de la croûte terrestre serait comprise entre 70 et  $132 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Concernant le Pb, sa teneur moyenne varie entre 5 et  $30 \text{ mg.kg}^{-1}$  (Wedepohl, 1995) ou, est de l'ordre de 10 à  $30 \text{ mg.kg}^{-1}$  (USDHHS, 2007). Pour ces auteurs, le taux du Zn est un peu plus élevé dans les sédiments argileux ( $80$  à  $120 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) et les schistes. Pour Pereck (2013), l'abondance moyenne dans la croûte terrestre du Pb serait estimée à  $14 \text{ mg.kg}^{-1}$ . En comparaison avec ces teneurs naturelles, celles que nous avons dosées sont inférieures, notamment, pour le Zn, avec un maximum de  $32,73 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Quant au Pb, de l'ordre ( $30,97 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) et légèrement supérieur au taux moyen.

Concernant Ni, INERIS (2006) indique que les concentrations des roches sédimentaires seraient de l'ordre de 20 à 40 mg.kg<sup>-1</sup> et, dépasseraient même 100 mg.kg<sup>-1</sup> dans les roches volcaniques. Or, dans la croûte terrestre, son abondance moyenne est estimée à 75 mg.kg<sup>-1</sup> Pereck (2013). À partir des concentrations du Ni, déterminées dans les échantillons de roches, on ne peut pas parler d'anomalie géochimique. C'est aussi le cas de Cu, Mn, Mo, Sr, Ti et Fe. En effet, en référence aux travaux de INERIS (2006), la composition moyenne de la croûte terrestre en cuivre serait comprise entre 45 et 70 mg.kg<sup>-1</sup>, et peut même être estimée jusqu'à 100 mg.kg<sup>-1</sup> ; et, pour Pereck (2013), son abondance moyenne est estimée à 60 mg.kg<sup>-1</sup> dans la croûte terrestre. Pour Mn, qui n'est véritablement pas un élément trace, il est normalement à un taux pouvant aller jusqu'à 1000 mg.kg<sup>-1</sup> (Choinière et Beaumier, 1997), tandis que Pereck (2013) évalue son abondance moyenne à 950 mg.kg<sup>-1</sup>. Quant à l'arsenic (As), dans la partie superficielle de l'écorce terrestre, sa concentration moyenne est évaluée à 2 mg.kg<sup>-1</sup> par Taylor et McLenan (1985), Kabata-Pendias et Pendias (1992) et, plus tard, à 1,8 mg.kg<sup>-1</sup> par Pereck (2013). Et, dans les roches d'origine sableuse, il varie de 0,5 à 2,5 mg.kg<sup>-1</sup> et peut atteindre 10 mg.kg<sup>-1</sup> dans les roches argileuses (Kabata-Pendias, 1994). Or, dans les métasédiments que nous avons analysés, les teneurs en As varient de 2,83 à 4,65 mg.kg<sup>-1</sup>, ce qui est légèrement supérieur à la teneur naturelle. Pour Mo, Ti, Sr et Fe, Pereck (2013) estime leur abondance moyenne dans la croûte terrestre, respectivement, à 1,2 mg.kg<sup>-1</sup>, 5650 mg.kg<sup>-1</sup>, 370 mg.kg<sup>-1</sup> et 56300 mg.kg<sup>-1</sup>. Ces valeurs sont largement supérieures aux valeurs trouvées dans les roches analysées, à l'exception de Mo dont les quantités dosées dépassent largement la valeur moyenne indiquée, de 1,2 mg.kg<sup>-1</sup>. Ces teneurs dosées varient de 11,2 mg.kg<sup>-1</sup> à 21,34 mg.kg<sup>-1</sup>, et plaident en faveur d'un phénomène anomal en Mo.

## **6.2. Morphopédologie des sols étudiés**

L'étude morphologique des sols du Blafo-Guéto a porté, d'une part, sur les types de sols, leur classification et, d'autre part, sur les dynamiques mises en jeu, c'est-à-dire, le type de pédogenèse. Pour la classification, les observations du profil de sol permettent d'étudier les principales variables géopédologiques. De façon générale, les horizons de sols ont des couleurs jaunâtres en surface et rougeâtres en profondeur, et, de façon spécifique, les sols des sommet et de haut versant du Blafo sont jaunâtres, tandis qu'au Guéto, ce sont seulement les sols du sommet qui ont cette coloration. Pour le reste, c'est-à-dire, les sols du moyen et bas versant, au Blafo, et les sols du haut, moyen et bas de versant, au Guéto, ils sont rougeâtres. Ces résultats indiquent l'existence d'un gradient latéral et d'un gradient vertical de la variation de la couleur des sols. Ainsi, du sommet vers le bas versant, la couleur rouge des

sols, le long de la toposéquence, est croissante, tandis que, la couleur des sols est de plus en plus rouge, selon la profondeur. Différents auteurs (Duchaufour, 1956 ; Ségalen, 1969 ; Boulaine, 1983 ; Bornand *et al.*, 1984 ; Escadafal *et al.*, 1988 ; Isbell, 2002 ; Birmingham, 2003 ; Koné, 2006 ; Roque, 2007), ont indiqué et expliqué que la couleur des sols revêt une signification. Ils soutiennent, par la suite, que les couleurs des sols s'interprètent en termes de constituants et de mécanisme. Selon eux, le sol est un milieu très coloré, avec de nombreuses variations verticales, latérales et temporelles, permettant, comme souligné par, Gray et Morant (2003), Osbahr et Allan (2003) dans les travaux sur les connaissances traditionnelles des sols africains, d'apprécier et de classer ces sols. Par exemple, Koné *et al.* (2009a), Koné *et al.* (2009b) ont utilisé une quantification de la couleur des sols, pour estimer leur fertilité potentielle et identifier leur contenu en argiles, sables et limons. La matière organique, en tant que constituant, colore (Arrouays et Vion, 1993) en sombre (noir, marron, gris foncé) le sol, dont l'action est due aux microorganismes du sol qui l'accumulent. On a également, comme constituant, le fer ferreux ou fer réduit, dont la présence est due à un excès d'eau, qui colore le sol en gris ou bleu. On peut aussi citer le fer ferrique (oxydé), sous forme d'oxyhydroxyde (goethite), qui colore en brun ou en jaune (Plice, 1943 ; Waegemans et Henry, 1954 ; Decraene et Laruelle, 1955 ; Kubiena, 1956 ; Kojima, 1962). La goethite, est la conséquence d'un régime hydrique assez peu contrasté, caractérisé par un sol souvent humide, mais sans excès, alternant avec des phases de sécheresse, ni fréquentes, ni excessives, et, comme l'affirme Bédard (2009), elle précipite dans l'horizon B. Le fer ferrique peut aussi être sous forme d'oxyde (hématite), et, dans ce cas, il colore le sol en rouge. Ainsi, la présence de l'hématite est la conséquence d'un régime hydrique contrasté, avec alternance fréquente d'une humidité forte, mais aérée, et d'une sécheresse accentuée.

Sur cette base, on peut expliquer la variabilité des couleurs des horizons décrits au Blafo et au Guéto. En effet, tous les horizons décrits et matérialisés comme étant ceux d'accumulation ou de profondeur (horizons B) sont de couleur rouge. Et, si on se réfère à Assa (2005), les horizons B ou illuviaux, sont riches en argiles et, sont le lieu de migrations et d'accumulation d'argiles qui, très souvent, sont accompagnées de fer. En conséquence, ces horizons brunissent ou rougissent. La forte humidité des horizons B fait intervenir le phénomène de drainage qui, s'il est bon et sans tâche, indique la rapide évacuation de l'eau, ou, dans le cas contraire (moyennement bon ou mauvais), peut entraîner des tâches. Les horizons B décrits sont en majorité tachetés, on peut donc, dans ce cas, attester de l'évacuation moyennement rapide de l'eau reçue par ces horizons, à cause des couleurs vives des tâches. En plus de la dynamique verticale des horizons des profils, on s'est aperçu, au niveau latéral, comme l'ont

d'ailleurs signifié Yao-Kouamé *et al.* (2011), qu'au sommet, les profils sont plus jaunâtres qu'en bas de versant, où ils sont plus rougeâtres. Cela témoignerait du drainage latéral ou de l'écoulement, au cours desquels les éléments sont transportés de haut en bas, suivi d'une relative accumulation. En effet, le drainage vertical est dominant au sommet et au haut de versant, entraînant une accumulation de particules fines (argile, limon), d'oxydes (hématite) et d'hydroxydes de fer (goethite) dans les horizons de profondeur et d'accumulation, responsables de la coloration vive des sols tropicaux (Mauricio et Ildeu, 2005). La coloration rouge des horizons de surface est réduite, du fait de la lixiviation du fer, et, les horizons illuviaux, en profondeur, seront de plus en plus rouges. En revanche, au niveau latéral, l'écoulement est oblique (Valentin et Janeau, 1989) sur les versants, avec une intensité croissante le long du versant (Zhang *et al.*, 2006), entraînant avec lui, plus d'éléments fins. En conséquence, une relative décoloration croissante de la couleur rouge du sol, du sommet vers le bas versant, est observée, occasionnant ainsi une accumulation des éléments plus rouges. Elle est donc le fait de la topographie qui en effet, joue, un rôle important dans l'accumulation des éléments chimiques dans le sol, où les eaux d'écoulement et de drainage provenant du sommet à forte pente, riches en éléments chimiques, vont connaître une baisse de leur vitesse dans les niveaux à pente faible. Ces eaux déposent ainsi, les éléments dont elles étaient chargées.

En définitive, sur la base de la couleur des horizons décrits, et, selon Kouakou *et al.* (2013b), l'ensemble des profils ouverts au Blafo et au Guéto, indique des sols brunifiés, selon la classification CPCS (1967), avec pour équivalent dans le système WRB (2006), des cambisols. En effet, la couleur brune des sols est due à l'association de la teinte noire ou brun-noir de l'humus et de la teinte rouge ou orangée des composés du fer, aussi attribuée à la dynamique de l'activité biologique (Yao, 2006). En réalité, il s'agit des ponts établis par les hydroxydes de fer, entre les humus et les argiles, pour la construction d'un complexe argile - hydroxyde de fer - humus, entraînant la coloration brune des sols (Soltner, 1992). Ainsi, comme processus pédogénétique majeur, on peut parler de brunification, et affirmer que la couverture pédologique des collines Blafo et Guéto est assez monotone, puisque tous les sols sont brunifiés. Dans ces conditions, il apparaît difficile de mettre en évidence une liaison entre le type génétique de sol et la nature des formations rocheuses. Car, comme cela a été indiqué dans le chapitre relatif aux informations sur les formations géologiques étudiées, il existe une diversité de formations dans le secteur du Blafo-Guéto. Et, logiquement, il devrait y avoir une variabilité des sols, en fonction de la nature des roches. On peut donc allier la brunification des sols à la présence d'humus, colorant les horizons de surface, ainsi qu'à celle du fer,

abondant dans ces formations altérées. Toutefois, on observe que, dans notre cas, l'approche géopédologique permet de mettre en évidence quelques variations de structure, texture, porosité, drainage, etc.

La structure des sols étudiés est identique pour tous les profils : les horizons organo-minéraux sont à structure grumeleuse et les autres horizons sont à structures polyédrique, polyédrique subanguleuse, polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse, polyédrique anguleuse. Selon Algayer et Darboux (2012), Cherfouh et Merrouki (2012), Fernandez-Ulgade *et al.* (2012), Goutal *et al.* (2012), la structure d'un sol est une caractéristique qui évolue fortement et, parfois, très rapidement. Elle évolue au cours du temps, sous l'effet des contraintes mécaniques appliquées au sol lors des diverses opérations (culturales, routières, minières, industrielles, etc.) qui, indéniablement, entraînent la fragmentation, le déplacement ou la compaction. La connaissance de la structure des sols étudiés renseigne sur leur fonctionnement actuel, ainsi que sur de nombreux paramètres. On dira que les horizons organo-minéraux des sols du Blafo-Guétou sont bien structurés, et sont le lieu où règne une bonne activité biologique. En effet, selon Baize et Jabiol (1995), la structure grumeleuse, que l'on classe dans le groupe des structures pédo-biologiques, est construite principalement par l'activité biologique. Ils soulignent que les caractéristiques de ces horizons à structure grumeleuse, vont d'une bonne rétention de l'eau et des éléments nutritifs, d'un bon drainage, d'une bonne aération, d'un bon développement du système racinaire des végétaux à une bonne résistance à l'érosion. Cette remarque se justifie par le fait que, tous les horizons organo-minéraux décrits, sont à un bon niveau de drainage, une bonne aération, marquée par de bonnes valeurs de l'Eh et, sont le lieu de foisonnement de nombreuses racines. En revanche, hormis les horizons organo-minéraux, les autres horizons, à structure polyédrique, polyédrique subanguleuse, classés dans le groupe des horizons pédiques, sont moins bons, au plan agronomique, comparés aux horizons à structure grumeleuse ; car selon Baize et Jabiol (1995), ces structures polyédrique, polyédrique subanguleuse se font par la fissuration des argiles et des limons et, résultent principalement de phénomènes de retrait-gonflement. La texture argilo-sableuse ou argileuse de ces niveaux d'horizons de sols, à structure polyédrique, polyédrique subanguleuse, a donc été primordiale dans ces conditions, rejoignant en cela Pardini *et al.* (2004), qui soutiennent que la texture est une propriété physique majeure, contrôlant la variabilité et la qualité des composants des horizons, en dessous des horizons organiques, permettant d'apprécier les fonctions de pédo-transferts (Bouma, 1989) et aidant, par exemple, à prédire les caractéristiques hydrodynamiques (FAO, 2007) des sols.

Cette affirmation se justifie dans le cas de la présente étude, où tous ces horizons sont bruns tachetés, signe d'un dynamisme de l'eau à un moment donné, expression d'un engorgement temporaire ou permanent.

Les autres critères (porosité, drainage, tâches) pris en compte, montrent que la corrélation est bien assurée, dans le cas des sols décrits au Blafo et au Guéto, où s'apprécient aisément le lien entre bonne porosité, bon drainage, manque de tâches d'hydromorphie et structure grumeleuse. Les tâches observées au niveau des horizons à structure polyédrique subanguleuse, témoignent de la présence temporaire d'un engorgement en eau. Ces tâches sont bien différentes des couleurs hétérogènes dues à l'altération des minéraux, tel que souligné par Yoro (2002).

Du point de vue de la dynamique, c'est-à-dire des processus pédogénétiques, en plus de la brunification, les sols développés sur la portion volcano-sédimentaire birimienne du Blafo-Guéto sont riches en éléments grossiers, rajeunis et indurés par endroits. On admet dès lors, comme l'ont souligné Yao-Kouamé (2007a et 2007b) à Anikro et à Kahankro (Toumodi) et Yao-Kouamé *et al.* (2008) dans le massif du Yaouré, que le remaniement et le rajeunissement accompagnent le processus de brunification. Le remaniement fait allusion aux taux des éléments grossiers, du reste, très abondants (> 60%) dans les sols décrits au Blafo-Guéto, notamment, dans les horizons intermédiaires, les horizons d'accumulation à texture argilo-sableuse. C'est un processus pédogénétique secondaire, comme l'a signalé Duchaufour (1977), qui intervient dans l'évolution des sols, le plus souvent issus d'une roche préexistante ou de proportions de matières organiques. La présence de ces éléments grossiers, composés essentiellement de concrétions ou nodules ferrugineuses et de quartz, peut constituer un obstacle majeur au développement racinaire, où, en revanche, maintenir la porosité du sol et la protection contre le tassement. La grande porosité qu'ils occasionnent devrait contribuer à réduire considérablement l'eau dans le sol ; mais, du fait de la nature de ces éléments grossiers (concrétions et nodules ferrugineuses), l'eau arrive à s'y imbiber avant d'être restituée aux plantes, comme l'a signalé Boa (1989) à Touba, au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Quant au rajeunissement, il est, dans le cas des sols décrits, étroitement lié à la variation des teintes ou apparition des tâches jaunes, ocres, orangées, violacées, rouilles dans les divers horizons. On peut expliquer ce phénomène par plusieurs paramètres, dont la topographie, l'action hydrolysante des eaux de pluie, l'altération de la roche sous-jacente, etc. Ainsi, Bech *et al.* (1983), allient le rajeunissement des sols à l'altération des roches par l'action hydrolysante des eaux, qui va libérer différents oxydes et bases, entraînant des

colorations diverses. Ceci est vraiment marqué, dans le cas des sols du Blafo et Guéto, au niveau des positions de sommet et de haut versant, où ces tâches sont ocres-jaunes, ocres-rouges. Ces tâches sont dues à la présence d'oxyde de fer (hématite rouge) et d'hydroxyde de fer (goéteite), de la matière organique (Barnérias *et al.*, 2004), à l'origine de la coloration brune des sols. Outre la position topographique, il faut y ajouter le phénomène de l'érosion, qui constitue un élément du rajeunissement, en mettant à découvert les horizons plus profonds, plus ou moins tachetés. Quant aux positions de bas versant, l'engorgement hydrique des sols, entraîne, très souvent, une réduction partielle du fer, qui se solubilise et migre. Ainsi, après ressuyage du sol, le fer solubilisé précipite et forme des tâches rouille. Par la suite, une asphyxie permanente du milieu réduit le fer, entraînant une teinte grise ou bleutée (gley) ; une asphyxie temporaire qui réoxyde le fer, donnant des tâches ocres, associées à des concrétions noires (pseudogley).

### 6.3. Pédogéochimie des sols étudiés

Le phénomène de transformation chimique ou de dissolution des minéraux, désigné sous le terme d'altération, suivi, par la suite, de la formation des sols, a été longtemps développé. Un exemple, parmi tant de travaux de recherche (Düzgören-Aydın *et al.*, 2002 ; Düzgören-Aydın et Aydın, 2003 ; Price et Velbel, 2003 ; Bozkurtoglu *et al.*, 2006 ; Ohta et Arai, 2007 ; Ceryan *et al.*, 2008 ; Violette, 2010 ; Rigopoulos *et al.*, 2010 ; Yildiz *et al.*, 2010 ; Ceryan, 2011 ; Ceryan, 2012), est l'examen du niveau d'altération des sols ou de leur indice d'altération. Les indices d'altération, comme l'ont démontré Nesbitt et Markovics (1997), Sharma et Rajamani (2000), Sharma et Rajamani (2001), Dalai *et al.* (2002), Driese *et al.* (2005), Singh *et al.* (2005), Goldsmith *et al.* (2008), Braun *et al.* (2009), Rajamani *et al.* (2009), Singh (2009), sont fréquemment utilisés pour caractériser l'évolution chimique de sols ou de sédiments. Au cours du présent travail, l'indice d'altération des sols étudiés a été déterminé sur la base du CIA (Chemical Index of Alteration) et du STI (Silica-Titania Index). Le CIA, tel que décrit par Nesbitt et Young (1982), évalue la mobilité des cations  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  par rapport à  $\text{Al}^{3+}$ , considéré comme un élément immobile. Lors de l'examen des taux des différents oxydes d'Al, de Ca, de Na et de K obtenus, le taux d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  de tous les échantillons est très nettement supérieur aux taux du  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{CaO}$ . Ainsi, plus la valeur d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  est élevée, plus les taux de  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{CaO}$  diminuent, mais, de façon proportionnelle, rejoignant en cela Wronkiewicz et Condie (1987), qui ont montré que durant l'altération, le lessivage et la mobilité des éléments comme le calcium, le sodium et le potassium, sont proportionnels aux taux d'altération. On admet alors que l'intensité d'altération des sols étudiés est très poussée,

comme indiquées par les valeurs des indices du CIA, proches de 100, et où, plus de cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ) ont été perdus. De plus, toutes les valeurs du STI calculées sont en dessous de 90, lesquelles sont, en moyenne, de 50, tel qu'indiqué par les travaux de De Jayawardena et Izawa (1994). Ainsi, les horizons C décrits sur le terrain comme étant partiellement développés, sont considérés comme très bien individualisés. On n'a plus des horizons de type (C), mais plutôt des horizons C.

Les différents rapports moléculaires  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  des horizons des sols décrits qui, en réalité, rendent compte de l'élimination de la silice et de la présence d'alumine, expriment des valeurs qui ne sont, certes, pas élevées, mais, qui ne sont pas inférieures à 1, notamment dans les horizons B. Perraud (1971), soulignait que la majorité des horizons B des sols de Côte d'Ivoire, issus de schistes ou de granite, avait des valeurs  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  comprises entre 1,7 et 1,9 et que, seules des conditions spéciales de drainage (relief important) et de roches riches en minéraux ferromagnésiens abaissent le rapport jusqu'à des valeurs nettement inférieures à 1. Cette affirmation de Perraud, peut-être ainsi prise en compte dans le cas du Blafo-Guéto, dont les formations géologiques telles qu'indiquées par Grandin et Perseil (1983) sont composées de schiste et de quartzite. En plus, près des lieux de prélèvement des échantillons sols, l'on a rencontrés et décrits des métasédiments, riches en  $\text{SiO}_2$ .

L'altération, libère progressivement des éléments qui peuvent passer en solution. Et, les réactions dans les solutions (acido-basique, oxydoréduction) sont des processus beaucoup plus rapides, qui reflètent ou peuvent refléter les variations journalières ou saisonnières de l'état du système, affectant les trajectoires de la pédogenèse (Chadwick et Chorover, 2001). Le statut acido-basique des sols au Blafo-Guéto, tel qu'étudié à l'état actuel, indique qu'il s'agit de sols acides à peu acides, avec un potentiel redox variant en fonction du pH. En effet, selon les travaux de Morales et Ferreiro (2009), le pH et l'Eh évoluent en sens opposés. Cette situation, comme pour corroborer ce qu'ont dit ces deux auteurs, est celle du Blafo et du Guéto. En fait, le constat est que, lorsque dans les horizons organo-minéraux des sols du Blafo, le taux de pH est élevé, donc moins acide, le Eh est moins grand. Ceci est marqué par l'accroissement des valeurs du Eh des horizons organo-minéraux et de profondeur vers ceux d'accumulation. Quant aux valeurs du pH, elles diminuent de ces horizons organo-minéraux vers les horizons d'accumulation. Au niveau des sols du Guéto, c'est le même cas, à l'exception des profils du haut, moyen et bas de versant, où le phénomène inverse est observé, avec de faibles variations. On peut expliquer ce phénomène en considérant que le pH, dans sa fonction de

régulation de la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol, a, généralement, des valeurs qui tendent vers la neutralité dans les horizons organo-minéraux.

Concernant la dynamique des ETM étudiés au Blafo-Guétó, les travaux récents de Kouakou *et al.* (2013a), ont indiqué que les sols ne sont pas pollués en ces éléments. En effet, la détermination des concentrations totales des ETM, comme le disent Dorina et Micheal (2005), Albanese (2008), peut fournir des informations de fonds, sur la fertilité et le statut des ETM du sol. En réalité, la teneur totale d'un élément métallique dans un sol comprend toutes les formes de l'élément, y compris celles intégrées dans les réseaux cristallins des minéraux (argiles, silicates, carbonates, oxydes, etc.). Et, évaluer le stock total d'un élément constitue une bonne approche pour étudier le degré et l'ampleur de la contamination d'un sol par un élément métallique. Ainsi, l'appréciation des dynamiques verticale et latérale des ETM étudiés au Blafo-Guétó, en considérant la part géogène de ces ETM, et, à partir des moyennes des teneurs totales en ces éléments dans les horizons de surface ou de profondeur, indique que ces teneurs sont inférieures aux teneurs naturelles communément annoncées dans les sols. D'après Kabata-Pendias et Pendias (1992), les teneurs naturelles des sols en Pb sont, en moyenne, de 32 mg.kg<sup>-1</sup>, et varient entre 10 et 67 mg.kg<sup>-1</sup>, et, selon Alloway (1995), sont inférieures à 30 mg.kg<sup>-1</sup>. Pour Baize (1997), les teneurs naturelles de Pb dans les sols ordinaires, de toutes granulométries, hors anomalies géochimiques, varient entre 9 et 50 mg.kg<sup>-1</sup>; et, dans les sols à anomalies naturelles modérées, les teneurs varient de 60 à 90 mg.kg<sup>-1</sup>. Dans le cas des sols étudiés, ces teneurs atteignent parfois 44 mg.kg<sup>-1</sup>, avec une forte concentration dans les horizons de surface. À cet effet, McBride *et al.* (1997), Hettiarachchi et Pierzynski (2002) ont indiqué une forte réactivité entre le plomb et la matière organique, ponctuée par une faible solubilité et une mobilité du Pb (Badawy *et al.*, 2002). En réalité, le plomb est en grande partie insoluble dans l'eau, c'est généralement un constituant mineur de l'eau de surface et de l'eau souterraine. Il tend à être absorbé par les particules de sol (Walling *et al.*, 2003; Turnewitsch *et al.*, 2004) et par les substances organiques; il est moins biodisponible que les autres métaux (Van der Perk, 2006) et, persiste ainsi, dans le sol, ce qui en fait une source potentielle de pollution (Kartal *et al.*, 2006). En outre, la faible solubilité du plomb dans l'eau rend son absorption par les plantes, généralement, restreinte, avec une faible mobilité, comparée au Cd et au Zn (Oluwatson *et al.*, 2008).

Au niveau du Zn, Adriano (2001), Pais et Benton (2000) évaluent la teneur moyenne à 50 mg.kg<sup>-1</sup>, en indiquant que les teneurs naturelles dans les sols varient entre 10 mg.kg<sup>-1</sup> et 300

mg.kg<sup>-1</sup>. Dans les sols étudiés, les teneurs se retrouvent dans cette fourchette, avec un maximum de 106 mg.kg<sup>-1</sup>. L'étude de la dynamique verticale du Zn fait ressortir une forte concentration dans l'horizon enrichi en argiles, attestant de son caractère mobile, tel qu'indiqué par Fernandez-Cornudet (2006), et démontré, plus tôt, par Duchaufour (2001), qui affirment que, dans les sols lessivés, acides, Zn accompagne l'argile dans sa migration et s'accumule dans l'horizon enrichi en argile.

Selon Alloway (1995), Pais et Benton (2000), les teneurs naturelles de cadmium dans les sols sont comprises entre 0,06 et 1,1 mg.kg<sup>-1</sup> et, proches des valeurs obtenues dans les sols étudiés, à l'exception du site Guéto, où nous avons une concentration allant jusqu'à 1,97 mg.kg<sup>-1</sup>, au bas de versant. Le cadmium est plus facilement retenu par les hydroxydes de fer et par la matière organique que par les argiles (Perrono, 1999). Or, dans les sols étudiés, les horizons organo-minéraux sont les plus riches en Cd, confirmant cette assertion, à l'exception du site Guéto, où, les teneurs en Cd sont plus riches dans les horizons B de bas versant, notamment, au niveau des profils G4 et G5, avec des horizons à induration de fer. Ce constat pourrait s'expliquer par la rétention du Cd par les hydroxydes de fer, comme l'a indiqué Adriano (2001). En réalité, le cadmium, dans les sols, existe à très faibles teneurs et est l'élément le plus redouté, parce que très toxique. Il est mobile, facilement biodisponible, et peut migrer en profondeur pour aller contaminer les nappes phréatiques.

Concernant l'As, Bowen (1979) situe la valeur moyenne à 6 mg.kg<sup>-1</sup>, et indique une variation comprise entre 0,1 et 40 mg.kg<sup>-1</sup>; tandis que, Kabata-Pendias et Pendias (2001), suggèrent que les moyennes en As, dans les sols sableux (podzols), sablo-limoneux, de type cambisols, sont, respectivement, de 4,4 mg.kg<sup>-1</sup> et de 8,4 mg.kg<sup>-1</sup>. Or, dans les sols étudiés au Blaf-Guéto, les teneurs en As sont inférieures à 0,25 mg.kg<sup>-1</sup>. C'est le même constat pour le mercure (Hg), pour lequel, Baize (2000) a situé les valeurs limites à 1 mg.kg<sup>-1</sup>. Henin (1983), Baize (2000) signalent que les valeurs limites du Cr, Cu, Ni, sont, respectivement, de 150 mg.kg<sup>-1</sup>, 100 mg.kg<sup>-1</sup> et 50 mg.kg<sup>-1</sup>. Baize (2000) indique que dans les sols français, les teneurs du Cr vont de 10 à 90 mg.kg<sup>-1</sup>, 90 à 150 mg.kg<sup>-1</sup>, 150 à 3180 mg.kg<sup>-1</sup>, respectivement, pour les sols hors anomalies géochimiques, pour les sols à anomalies naturelles modérées et pour les sols à fortes anomalies naturelles. Au niveau du Cu, ces valeurs sont, dans le même ordre, de 2 à 20 mg.kg<sup>-1</sup>, 20 à 62 mg.kg<sup>-1</sup>, 65 à 102 mg.kg<sup>-1</sup> et, pour Ni, elles sont de 2 à 60 mg.kg<sup>-1</sup>, 60 à 130 mg.kg<sup>-1</sup>, 130 à 2 076 mg.kg<sup>-1</sup>. Les valeurs ainsi indiquées sont largement supérieures à celles obtenues pour Cr et Ni dans notre zone d'étude, à l'exception du Cu, dont

quelques valeurs atteignent parfois  $226 \text{ mg.kg}^{-1}$ . On peut ainsi, pour le cas du Cu, attester d'une forte anomalie dans les sols du Blafo-Guéo.

Il en est de même pour Mn, avec des teneurs atteignant  $15000 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Mn est naturellement présent dans les sols, qui peuvent contenir entre  $770$  et  $1000 \text{ mg.kg}^{-1}$ , tel que constaté au Québec par Choinière et Beaumier (1997). Mais, pour Kabata-Pendias et Sadurski (2004), les concentrations en Mn des sols varient de  $270$  à  $2000 \text{ mg.kg}^{-1}$  en sols sableux, pour atteindre  $525$  à  $9200 \text{ mg.kg}^{-1}$  dans les sols argilo-limoneux. Au-delà, Mn présente une anomalie et, selon Nangah *et al.* (2013), à une teneur en Mn de  $9228,96 \text{ mg.kg}^{-1}$ , les sols se situent dans la gamme des teneurs critiques pouvant entraîner des phénomènes de toxicité. En milieu acide et à pH inférieur à  $4,5$ , Mn devient soluble (Loué, 1993). Par contre, au-dessus de pH  $7$ , Mn est immobilisé dans le sol, sous forme d'oxydes tri et tétravalents, très peu solubles (Perrono, 1999). Les sites de Blafo et Guéo sont au-delà de ces valeurs, et, spécifiquement, le site Blafo, avec des pH ni inférieurs à  $4,5$ , ni supérieurs à  $7$ . Pour Kabata-Pendias et Sadurski (2004), Mn est moyennement mobile dans le sol, et est plus fixé par les sols riches en argiles que les sols ou horizons riches en matière organique. Or, les études révèlent, aussi bien au Blafo qu'au Guéo, que les horizons les plus riches en Mn sont les horizons organo-minéraux de surface, notamment, ceux de moyen et bas versant. On pourrait ainsi affirmer que la topographie a pu avoir une influence, occasionnant un transport des éléments Mn, de l'amont vers l'aval.

D'après Baize (1997), le chrome présente une très faible mobilité dans les sols, qu'il ait une origine anthropique ou naturelle, et, pour Notling *et al.* (1996), Algan *et al.* (2004), il est lié, préférentiellement, à la fraction résiduelle, notamment, à l'argile. Cette indication rejoint notre constat au Blafo, où les plus fortes teneurs en Cr, concernent les horizons d'accumulation de type B, des haut et moyen versants, riches en argiles. Par contre, au Guéo, cette affirmation n'est pas vérifiée, même si, dans certains cas, comme ils le soulignent par la suite, l'association du Cr avec la matière organique est observée, quoique relativement faible. Tout comme Cr, le cuivre (Cu) est un élément peu mobile dans les sols, sauf dans des conditions extrêmes d'acidité. Il s'associe aussi à la fraction résiduelle, comme constaté sur le site du Guéo et, également, à la fraction liée à la matière organique et aux sulfures (Ramos *et al.*, 1994, Zhou *et al.*, 1998) ; c'est le cas au Blafo, où les teneurs en Cu sont très fortes dans les horizons organo-minéraux. Au niveau du Ni, c'est le même constat, et, Added (1981), Lopez-Sanchez *et al.* (1996), indiquent que Ni s'associe préférentiellement à la fraction résiduelle.

La concentration en Ti dans la croûte terrestre est estimée à  $5650 \text{ mg.kg}^{-1}$  (Pereck, 2013), tandis que, Baize (2000) situe la gamme de valeurs couramment observées dans les sols hors anomalies naturelles, dans les sols à anomalies naturelles modérées, dans les sols à fortes anomalies naturelles, respectivement, entre  $0,10$  et  $1,7 \text{ mg.kg}^{-1}$ ,  $2,5$  et  $4,4 \text{ mg.kg}^{-1}$ ,  $7$  et  $55 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Or, dans le cas des sols étudiés, les valeurs sont largement supérieures aux valeurs indiquées par Baize. Ces valeurs varient entre  $1710,60$  et  $3847,66 \text{ mg.kg}^{-1}$  au Blafo, et entre  $790$  et  $5493,28 \text{ mg.kg}^{-1}$  au Guéto. L'anomalie géochimique en Ti est fortement marquée dans les sols du Blafo-Guéto. Par contre, au niveau du molybdène, en dehors des gisements, les concentrations dans l'environnement sont généralement faibles. La concentration dans la croûte terrestre est estimée à  $1,2 \text{ mg.kg}^{-1}$  par Pereck (2013), et, dans les sols, les teneurs sont d'environ  $2 \text{ mg.kg}^{-1}$  selon Coughtrey et Thorne (1983). Ainsi, les teneurs en Mo des sols du Blafo et du Guéto étudiés, sont largement supérieures à la teneur habituellement rencontrée dans les sols, dont les valeurs sont indiquées par Coughtrey et Thorne (1983). En effet, les teneurs se situent entre  $1,67$  et  $15,94 \text{ mg.kg}^{-1}$  dans les sols du Blafo et entre  $2,27$  et  $17,44 \text{ mg.kg}^{-1}$  dans les sols du Guéto. On peut donc conclure, comme dans le cas du Ti, à un phénomène anomalique en Mo au Blafo-Guéto. Les plus fortes teneurs en Mo ont été enregistrées dans les horizons d'accumulation, relativement riches en argiles, et souvent en rapport avec les plus fortes teneurs en Fe, rejoignant en cela, Coughtrey et Thorne (1983), qui disent que, de manière générale, le molybdène dans les sols est souvent associé, soit avec les argiles, soit avec les minéraux ferreux. Concernant le fer (Fe), Pereck (2013) indique que dans la croûte terrestre, sa valeur est estimée à  $56300 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Dans les sols, du Blafo-Guéto, les valeurs déterminées se situent entre  $31672,17$  et  $59304,56 \text{ mg.kg}^{-1}$  au Blafo et entre  $27918,30$  et  $53321,03 \text{ mg.kg}^{-1}$  au Guéto. Les sols du Blafo-Guéto sont ainsi, très riches en fer, caractéristiques des sols tropicaux.

De façon générale, dans l'atmosphère, lorsqu'ils sont libérés, les ETM sont une source majeure de contamination environnementale. C'est le cas dans les zones minières, où les ETM constituent un réel danger (Dudka et Adriano 1997; McLaughlin *et al.*, 1999; Adriano 2001; Pruvot *et al.*, 2006 ; Zhou *et al.*, 2007; Lin *et al.*, 2007 ; Navarro *et al.*, 2008). Selon Abollino *et al.* (2002), Makino *et al.* (2010), Mwegoha et Kihampa (2010), la toxicité des métaux ne dépend pas uniquement de la concentration totale, mais aussi de leur réactivité et leur mobilité avec les autres composants de l'écosystème. Ainsi, la mobilité d'un ETM peut augmenter considérablement dans le cas où il est associé à une molécule organique, ce qui peut conduire à un lessivage accru au sein du profil (Aubert *et al.*, 2001), ou à une modification de sa toxicité. De nombreux auteurs classent cette réactivité dans l'ordre suivant :  $\text{Ni} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb}$

(Kabala et Szerszen, 2002), tandis que d'autres (Papafilippaki *et al.*, 2007) la classent dans l'ordre Cu>Pb>Zn>Cr. De façon générale, la mobilité des métaux augmente avec l'acidité du milieu (Kabala et Szerszen, 2002). Cependant, certains composants des sols peuvent jouer un rôle tampon vis-à-vis de cette mobilité. Ainsi, les silicates, les carbonates, les phosphates, les oxydes, les argiles et les matières organiques peuvent contribuer à la rétention ou au piégeage des métaux. Plusieurs processus physico-chimiques sont donc responsables de ces mécanismes de rétention, allant de l'adsorption, la précipitation, la substitution à l'inclusion de ces métaux. Dans le cas de l'adsorption, phénomène de surface par lequel des atomes ou des molécules se fixent sur la surface solide d'un substrat, notamment, sur les argiles, elle est soit, physique (physisorption) et, dans ce cas, réversible (Manceau *et al.*, 2002) ; soit, chimique (chimisorption), généralement difficilement réversible (Sigg *et al.*, 2000). La notion de réversibilité, ou désorption, étant, bien entendu, liée à la transformation inverse de l'adsorption, par laquelle les molécules ou les atomes adsorbés se détachent du substrat. Dans ces conditions, le pH joue un rôle très important et régule la disponibilité des éléments dans le sol. Selon Lions (2004), un pH acide entraîne la mise en solution des sels métalliques, la mise en solution des phases de rétention, la désorption des cations et l'adsorption des anions. Ainsi, la solubilité diminue lorsque le pH augmente, et, la disponibilité diminue lorsque le pH descend sous la barre de 5,5. Et, si le pH est trop acide (pH < 4), certains éléments toxiques deviennent disponibles, tels l'aluminium, le fer, le cuivre et le zinc. Les métaux peuvent, dans ces conditions, précipiter dans l'eau des pores ou à la surface des particules solides, ou se substituer à un autre élément dans le réseau cristallin, ou encore être piégés dans les pores. Les différentes études corrélatives entre les ETM étudiés au Blafo-Guéto, attestent des relations entre Mn et les éléments Cr, Fe, Pb, Zn, Ni, entre Pb et les éléments Cd, Cr, Mn, Ni, Sr, Zn, entre Ti et les éléments Mo, Mn, Cr, entre Ni et les éléments Cr, Fe, Mn, entre Mn et Fe, qui semblent être gouvernées par le même facteur, indiquant une même source ou origine. Des différentes analyses de l'ACP, les regroupements entre Cd, Cr, Mn, Ni, Pb, pH, Sr et Zn d'une part, et entre Ti, Mo, d'autre part, sont apparus, corrélés entre eux. Dans le cas de la corrélation entre Mn et les autres éléments, on peut l'expliquer en considérant les propriétés magnétiques du Mn, le conduisant à former des liaisons ioniques avec les oxydes, les hydroxydes et les carbonates, comme souligné par Schäfer (2004). Ceci amène Mn à former des complexes (oxydes, silicates, carbonates) peu stables, dont la plupart sont moins solubles. Selon Lide (1999), Mn possède des propriétés communes avec Fe et des similitudes entre leurs comportements, amenant Hamon *et al.* (2004) à envisager les concentrations naturelles en ETM sur la base de leurs corrélations avec Fe et Mn, sur tous types de sols confondus.

Cette situation étant antérieurement décrite par Baize (1997), Salminen et Tarvainen (1997) et, plus tard, confirmée par Zhao *et al.* (2007), affirmant que Al, Fe et Mn sont les éléments majeurs les plus souvent les mieux corrélés avec les concentrations naturelles en ETM, occasionnant une association privilégiée des ETM avec les argiles, les oxydes et hydroxydes du sol. On pourrait ainsi expliquer, pour le cas de Fe, cette corrélation fortement marquée. Cette situation du Mn fait, comme l'ont indiqué Kelly et Thorne (2003), qu'à certaines formes, il est souvent utilisé pour prévoir le comportement d'autres métaux lourds dans les effluents miniers et, parfois utilisé comme radiotracteur. Cette forte corrélation entre Mn et Cd, Cr, Cu, Ni, Zn a aussi été décrite par Wong *et al.* (2002). Par ailleurs, 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). On a aussi, les oxydes de fer qui sont en mesure de fixer de nombreux éléments traces, et, les séquences de sélectivité des cations métalliques divalents, pour différentes formes de fer, avec lesquelles elles ont une plus grande affinité, comprennent Cu, Zn, Pb, Ni, Mn, Cd (Sparks, 1995). Reimann *et al.* (2002), Wong *et al.* (2002), Cecchi *et al.* (2008) ont aussi observé de fortes corrélations entre Cu, Pb, Zn et Fe. Dans le cas du Cr et Ni, Pierce *et al.* (1982), Chen *et al.* (1999), ont indiqué que dans certaines études, ils sont associés au même minéral dans le sol et, à Ni et Fe, ils sont liés par des propriétés ferromagnétiques communes, qui font que, souvent, Ni se substitue partiellement au fer.

### **Conclusion partielle**

Les éléments indispensables à l'interprétation, à la compréhension et à la discussion des principaux résultats de cette étude ont été fournis et développés dans ce chapitre.

# **C**ONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'appréciation de certaines données et paramètres concernant les sols décrits au niveau des collines Blafo et Guéto, a été le sujet traité dans ce travail. Les aspects étudiés ont principalement concerné, d'une part, la morphologie pédologique ou morphopédologie des sols, et, d'autre part, l'identification et le dosage de divers ETM, pour la prise en compte du fond géochimique de ces sols. Une étude géochimique des roches affleurantes dans le périmètre étudié a aussi été réalisée. L'objectif principal de ce travail était de contribuer à la caractérisation des sols, sur la base du 'contenu sol' actuel, en les ETM étudiés, et sur la base des principaux caractères macromorphologiques de ces sols, afin de disposer d'informations nécessaires pour amorcer l'établissement d'une base de données.

L'étude détaillée des échantillons de roches prélevés dans le périmètre d'étude, atteste de leur caractère métasédimentaire. Macroscopiquement, certaines de ces roches, de couleur grise à gris noir, présentent des fractures, tandis que d'autres, plus stratifiées, présentent des plans de schistosité, des plans de stratification et des failles. La composition minéralogique de ces roches est à quartz, feldspaths et minéraux phylliteux. Ces roches, très enrichies en silice, indiquent un caractère géochimique où, les alcalins ont un comportement anormal. Leur altération est donc très poussée et, la microanalyse R-X effectuée sur ces échantillons de roche, montre, qu'en plus du silicium (Si), sont présents le carbone (C), le sodium (Na), l'aluminium (Al), le potassium (K), le titane (Ti), le fer (Fe), le cuivre (Cu), le strontium (Sr) et l'oxygène (O). Les origines de ces métasédiments, ou le type de sédiment à l'origine de ces roches, connues grâce au diagramme de Herron, comprennent le grauwaque, la litharénite et la sublitharénite. Ces roches ne sont pas anormalement enrichies aux divers ETM étudiés, à l'exception du molybdène (Mo) et, à un degré moindre, de l'arsenic (As), du cadmium (Cd) et du plomb (Pb), qui ont des teneurs au delà des valeurs limites.

Les caractères macromorphologiques décrits indiquent des sols brunifiés, avec, dans l'ensemble, des teintes jaunâtres en amont et de teintes rougeâtres en aval, entraînant une coloration rouge croissante, du sommet au bas versant. De plus, de façon verticale, ces sols, ont des teintes jaunâtres dans les horizons de couverture ou horizons organo-minéraux, et des teintes rougeâtres dans les horizons de profondeur, plus riches en argiles. L'existence d'un gradient latéral et vertical de la couleur des sols est donc évidente. Ces sols brunifiés sont rajeunis, pourvus en un fort taux d'éléments grossiers, à même de constituer une contrainte à

leur mise en valeur, ayant une très bonne structure, de type grumeleuse, dans les horizons humifères, épais de 30 à 40 cm. Au-delà de cette profondeur, les structures, de type polyédrique, polyédrique subanguleuse, polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse, polyédrique anguleuse, sont moins bonnes, et les sols présentent, par endroits, des conditions d'hydromorphie temporaire. On observe, à certains endroits, une induration, notamment, au niveau des profils de bas versant. La porosité et la classe de drainage sont bonnes dans les horizons organo-minéraux et moins bonnes à partir de 40 cm de profondeur. Ce sont des sols fortement altérés, avec un indice d'altération chimique (CIA) proche de 100 et, la mobilité de  $Al^{3+}$  par rapport  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  et  $K^+$  y est faible, marquée par un enrichissement des horizons d'accumulation en  $Al^{3+}$ , suivant le rapport  $SiO_2/Al_2O_3$ , supérieur à 1. Le statut acido-basique de ces sols est acide à moyennement acide, avec une acidité des sols du Blafo moins prononcée que ceux du Guéto. Quant au potentiel redox, il varie en fonction du pH et en sens opposés.

S'agissant des teneurs totales en éléments traces métalliques (ETM), en l'état actuel, ces sols ne sont pas pollués ni en arsenic (As), en chrome (Cr), en mercure (Hg), en nickel (Ni), en plomb (Pb), en strontium (Sr), ni en zinc (Zn). Ces teneurs sont à des proportions où, le Fe et le Ti sont les plus grandes dans les sols. Le dosage chimique au spectromètre d'absorption atomique, indique que, seuls, le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), le molybdène (Mo), le titane (Ti) et à un degré moindre le cadmium (Cd) y présentent un phénomène d'anomalie géochimique légèrement au-dessus des teneurs moyennes, habituellement observées dans les sols. De plus, au niveau des corrélations entre les ETM étudiés, des relations existent entre Mn et les éléments Cr, Fe, Pb, Zn, Ni, entre Pb et les éléments Cd, Cr, Mn, Ni, Sr, Zn, entre Ti et les éléments Mo, Mn, Cr, entre Ni et les éléments Cr, Fe, Mn, entre Mn et Fe.

De tout ce qui précède, l'on a donc pu appréhender, de façon générale, l'objectif assigné à cette étude, en considérant les faciès, les organisations verticales et latérales, la détermination, la distribution et la corrélation entre les éléments ETM, constitutifs du fond pédogéochimique des sols étudiés au Blafo-Guéto. Ainsi, les hypothèses de recherche émises ont donc pu être vérifiées, permettant d'indiquer que :

- les sols du Blafo-Guéto sont issus de processus pédogénétique naturel et ne sont affectés par aucun phénomène d'anthropisation ;
- les sols du Blafo-Guéto sont bien structurés et bien développés ;

- le fond pédogéochimique local, au Blafo-Guéto, indique des teneurs habituellement rencontrées dans les sols pour les éléments As, Cr, Hg, Ni, Pb, Sr, Zn, et des teneurs anormales pour les éléments Cu, Mn, Mo, Ti et ± Cd.

## **PERSPECTIVES**

Une meilleure connaissance des sols du Blafo-Guéto nécessiterait plusieurs niveaux d'intervention, avec le développement de nombreux autres aspects, qui n'ont pu être abordés dans le cadre de ce travail. Pour arriver à établir, véritablement, une base de données sur les sols du Blafo-Guéto, cinq axes de recherche peuvent être envisagés, à savoir :

- l'étude de la minéralogie de ces sols, qui précisera le rôle des minéraux dans leurs propriétés d'échange, notamment des minéraux argileux, en vue de mieux apprécier la dynamique entre les ETM ;
- l'étude des différents degrés d'oxydations (états de valence) des ETM dans les sols ;
- l'étude des risques de transfert et de toxicité (spéciation) de ces contaminants inorganiques vers la chaîne alimentaire ;
- les questions du contrôle de la distribution spatiale et temporelle des flux d'altération, qui sont liées au rôle de l'hydrologie ;
- le devenir de ces ETM après l'ouverture et l'exploitation des chantiers miniers.

# **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abollino O., Aceto M., Malandrino M., Mentasti E., Sarzanini C. and Petrella F., 2002.** Heavy metals in agricultural soils from Piedmont, Italy. Distribution, speciation and chemometric data treatment. *Chemosphere*, 49, pp. 545-557.
- Aded A., 1981.** Etude géochimique et sédimentologique des sédiments marins du Delta du Rhône. Th. Doct. 3<sup>ème</sup> cycle. Uni. Pierre et Marie Curie, 263 p.
- ADEME, 2008a.** La pollution de l'air - Sources, effets, prévention. Coédition : ADEME/DUNOD, 232 p.
- ADEME, 2008b.** Agir contre l'effet de serre, la pollution de l'air et le bruit dans les plans de déplacements urbains – Approches et méthodes. Coédition : ADEME/CERTU, 90 p.
- Adriano D. C., 2001.** Trace elements in the Terrestrial Environment. Springer Verlag, New York, 866 p.
- Albanese S., 2008.** Evaluation of the bioavailability of potentially harmful elements in urban soils through ammonium acetate-EDTA extraction : a case study in southern Italy. *Geochemistry Exploration Environment Analysis*, 8 (1), pp. 49-57.
- Algan O., Balkis N., Namikcagatay M. et Sari E., 2004.** The sources of metal contents in the shelf sediments from the Marmara sea. *Turkey, Environ .Geol.*, 46, pp. 932-950.
- Algayer B. et Darboux F., 2012.** La stabilité structurale du sol varie à pas de temps journalier : évaluation de facteurs explicatifs. Un exemple en Beauce Chartraine. 11<sup>èmes</sup> journées d'étude des sols, Actes du colloque : Le sol face aux Changements globaux, Communication orale, (p 32), Versailles, 445 p.
- Alloway B. J., 1995.** The origins of heavy metals in soils, *in* : Alloway B. J. (ed), *Heavy metals in soils*. Blackie, Glasgow, pp. 29-39.
- ANADER, 2002.** Guide de l'élaboration de la monographie du département ou de la zone de Yamoussoukro. 7 p.
- Arcega-Cabrera F., Armienta M. A., Daesslé L. W., Castillo-Blum S. E., Talavera O. and Dótor A., 2009.** Variations of Pb in a mine-impacted tropical river, Taxco, Mexico : Use of geochemical, isotopic and statistical tools. *Applied Geochemistry*, 24, pp. 162-171.
- Armienta M. A., Talavera O., Morton O. and Barrera M., 2003.** Geochemistry of metals from mine tailings in Taxco, México. *Bull. Environ. Contamin. Toxicol.*, 71, pp. 387-393.

**Arrouays D. et Vion I., 1993.** Utilisation de la couleur des sols pour l'évaluation de leur taux de matière organique. Un test simple pour des sols limoneux du piémont pyrénéen. *Science du sol*, Vol. 31, 1/2, pp. 1-16.

**Assa A. D., 2005.** Précis de Pédologie. A l'usage des étudiants du second cycle des études universitaires. 2<sup>ème</sup> édition. Collection Sciences. EDUCI, 92 p.

**Astakhov A. S., Wang Rujian, Crane K., Ivanov M. V. and Gao Aiguo, 2013.** Lithochemical classification of the arctic depositional environments (Chukchi Sea) by methods of multivariate statistic. *Geochemistry International*, vol. 51, N°4, pp. 269-289.

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

**Avenard J. M., Girard G., Sircoulon J., Toucheboeuf P., Guillomet J.C., Adjanohoun E., Perraud A., 1971.** Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire, ORSTOM, n° 50, pp. 269-391.

**Azapagic A., 2004.** Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. *J. Clean. Prod.* 12, pp. 639-662.

**Badawy S. H., Helal M. I. D., Chaudri A. M., Lawlor K. and McGrath S. P., 2002.** Soil solid-phase controls lead activity in soil solution. *J. Environ. Qual.*, 31, pp. 162-167.

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

**Baize D., 2000.** Teneur totales en métaux lourds dans les sols français, résultats généraux du programme ASPITET. *Le courrier de l'environnement* n°39, pp. 39-54.

**Baize D., 2009.** Éléments traces dans les sols. Fond géochimiques, fond pédogéochimiques naturels et teneurs agricoles habituelles : définitions et utilités. *Courrier de l'environnement de l'INRA* n° 57, pp. 63-72.

**Baize D. et Jabiol B., 1995.** Guide pour la description des sols. Collection techniques et pratiques, INRA, Paris, 375 p.

**Baize D. et Tercé M., 2002.** Un point sur les éléments traces métalliques dans les sols : approches fonctionnelles et spatiales. INRA éditions, 565 p.

**Baize D. et Sterckeman T., 2004.** Importance de la détermination du fond pédogéochimique pour évaluer la pollution des sols par les métaux. L'exemple du site de Dornach. *Bulletin Société Suisse de Pédologie*, n° 27, pp. 63-68.

**Balabane M., 2006.** Matières organiques des sols et environnement. Mémoires des Sciences de la Terre, Université Pierre et Marie Curie, Académie de Paris 6, 52 p.

**Barnérias C., Böhm F., Dubois S., Junod G., Le Treis M. et Pousse J. S., 2004.** Effets de l'engorgement hydrique sur la couleur des sols et la distribution des espèces. Etudes du Bureau Agricole et Forestier de l'Ouest Guyanais (BAFOG), 34 p.

**Barnett J. et Adger N. W., 2007.** Climate change, human security and violent conflict. *Political Geography*, vol. 26, Elsevier, pp. 639-655.

**Bech B. J., Cardus J., Lasala M., Lamouroux M., Quantin P. et Segalen P., 1983.** Etude des sols formés sur arènes granitiques de la bordure Septentrionale de la Sierra de Prades (Tarragone, Espagne). *Cah. ORSTOM, Série Pédologie*, vol. XX, n°1, pp. 63-71.

**Bech J., Roca N., Barceló J., Duran P., Tume P. and Poschenrieder C., 2012.** Soil and plant contamination by lead mining in Bellmunt, Western Mediterranean Area. *J. Geochem. Explor.* 113, pp. 94-99.

**Betard F. et Bourgeon G., 2009.** Cartographie morphopédologique : de l'évaluation des terres à la recherche en géomorphologie. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n° 3, pp. 187-198.

**Bertrand R., 1972.** Morphopédologie et orientations culturelles des régions soudaniennes du Sine-Saloum (Sénégal). *L'Agronomie Tropicale*, 27, pp. 1115-1190.

**Bhatia M. R., 1983.** Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. *J. Geol.* 91 (6), pp. 611-627.

**Bhatia M. R. and Crook K. A. W., 1986.** Trace element Characteristics of Graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contrib. Mineral. Petrol.* 92, pp. 181-193.

**Birmingham D., 2003.** Local knowledge of soils : the case of contrast in Côte d'Ivoire. *Geoderm.*, 111 (3-4), pp. 481-502.

**Blowes D. W., Ptacek C. J., Jambor J. L. and Weisener C. G., 2004.** The Geochemistry of acid mine drainage. In: Lollar, B.S. (Ed.), *Environmental Geochemistry*. Holland, H.D., Turekian, K.K. (Exec. Eds.), *Treatise on Geochemistry*, vol. 9. Elsevier, Amsterdam, pp. 149-204.

**BNETD, 2001.** Relance de l'économie dans la région des lacs. 51 p.

**Boa D., 1989.** Caractérisation, propriétés hydrodynamiques, contraintes et potentialités agronomiques des sols gravillonnaires : cas de Booro-Borotou (région de Touba, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse Doc-Ing., Université d'Abidjan, 126 p.

**Boardman J., 2010.** A short history of muddy floods. *Land Degradation and Development*, 21, pp. 303-309.

**Bohn H. L., 1968.** Electromotrice force of inert electrodes in soil suspensions. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol, 32, 2, pp. 211-215.

**Bonhomme M., 1962.** Contribution à l'étude géochronologique de la plate-forme de l'Ouest - Africain. Thèse, Ann. Fac. Sc. Uni, Clermont-Ferrand n°5, 62 p.

**Bornand M., Dejou J., Robert M. et Roger L., 1984.** Composition minéralogique de la phase argileuse des Terres noires de Limagne (Puy de Dôme). Le problème des liaisons argiles-matière organique. *Agronomie*, 4 (1), pp. 47-62.

**Bouabdli A., Saïdi N., El Founti L. et Leblanc M., 2004.** Impact de la mine d'Aouli sur les eaux et les sédiments de l'oued Moulouya (Maroc). *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, 140, pp. 27-33.

**Boulaine J., 1983.** Dokouchaev V. V. et les débuts de la pédologie. *Revue d'histoire des sciences*, 36 (3-4), pp. 285-306.

**Boulet R., Chauvel A., Humbel F. X., 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. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., Vol.19, n°4*, pp. 309-321.

**Bouma J., 1989.** Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advance in Soil Science*, 9, pp. 177-213.

**Bourelrier P. H. and Berthelin J., 1998.** Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion. *CR. Acc Sci*, 42. Ed. Lavoisier, Paris, 440 p.

**Bowen H. J. M., 1979.** *Elemental Chemistry of the Elements*. Academic Press, London, New York, pp. 60-61.

**Bozkurtoğlu E., Vardar M., Suner F. and Zambak C., 2006.** A new numerical approach to weathering and alteration in rock using a pilot area in the Tuzla geothermal area, Turkey. *Engineering Geology*, 87, pp. 33-47.

**Braun J. J., Descloitres M., Riotte J., Fleury S., Barbiéro L., Boeglin J. L., Violette A., Lacarce E., Ruiz L., Sekhar M., Mohan Kumar M. S., Subramanian S. and Dupré B., 2009.** Regolith mass balance inferred from combined mineralogical, geochemical and geophysical studies: Mule Hole gneissic watershed, South India. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 73, pp. 935-961.

**Braungardt C. B., Achterberg E. P., Elbaz-Poulichet F. and Morley N. H., 2003.** Metal geochemistry in a mine-polluted estuarine system in Spain. *Applied Geochemistry* 18(11), pp. 1757-1771.

**Brou Y. T., Akindès F. et Bigot S., 2005.** La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cahiers Agricultures*, vol. 14, n° 6, pp. 533-540.

**Brown O., Hammill A. and McLeman R., 2007.** Climate change as the 'new' security threat: implications for Africa. *International Affairs*, vol. 83, n° 6, pp. 1141-1154.

**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 de l'université de Toulouse, INPT, France, 283 p.

**Calvet R., 2003.** Le sol. Propriétés et fonctions. Tome 1 : Constitution, Structure, Phénomènes aux interfaces. Editions France Agricole, 456 p.

**Campy M. et Macaires J. J., 2003.** Géologie de la surface : érosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux. 2<sup>ème</sup> édition, Dunod, Paris, 440 p.

**Casiot C., Bruneel O., Personné J.-C., Leblanc, M. et Elbaz-Poulichet F., 2004.** Arsenic oxidation and bioaccumulation by the acidophilic protozoan, *Euglena mutabilis*, in acid mine drainage (Carnoulès, France). *Science of the Total Environment*, 320, pp. 259-267.

**Cecchi M., Dumat C., Alric A., Felix-Faure B., Pradere P. and Guiresse M., 2008.** Multi metal contamination of a calcic cambisol by fallout from a lead-recycling plant. *Geoderma*, 144, pp. 287-298.

**Ceryan S., 2011.** Estimating of the Durability and Weathering State of Rock Materials Using Chemical Weathering Indices based on Cation Packing Value: A Case Study, *Proceeding of 11<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconferance*, 20-25 June 2011, SGEM 2011, Bulgaria, Volume I, pp. 437-444.

**Ceryan S., 2012.** Weathering Indices for Assessment of Weathering Effect and Classification of Weathered Rocks : A Case Study from NE Turkey. *In Earth Sciences*, Dr. Imran Ahmad Dar (Ed.), 648 p.

**Ceryan S., Tudes S. and Ceryan N., 2008.** A new quantitative weathering classification for igneous rocks. *Environmental Geology*, 55, pp. 1319-1336.

**Chadwick O. A. and Chorover J., 2001.** The chemistry of pedogenic thresholds. *Geoderma*, 100 (3-4), pp. 321-353.

**Chen M., Ma L. Q. and Harris W. G., 1999.** Baseline concentrations of 15 trace elements in Florida surface soils. *J Environ Qual*, 28, pp. 1173-1181.

**Cherfouh R. et Merrouki K., 2012.** Effets des passages de tracteur agricole sur la structure d'un sol limoneux sableux et le développement de la pomme de terre. 11<sup>èmes</sup> journées d'étude des sols, Actes du colloque : Le sol face aux Changements globaux, Communication orale, (p 22), Versailles, 445 p.

**Choinière J. et Beaumier M., 1997.** Bruits de fond géochimiques pour différents environnements géologiques au Québec, Ministère des Ressources naturelles - Service des minéraux industriels et de l'assistance à l'exploration, 60 p.

**Claussen M., Brovkin V., Ganopolski A., Kutzbaki C. and Petukhov V., 2003.** Climate change in northern Africa: the past is not the future. *Climate Change*, vol 57 (1-2), pp. 99-118.

**CMED, 1987.** Notre avenir à tous. Rapport Brundtland, 432 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, FUSA Gx, Gembloux, 442 p.

**Colinet G., Laroche J., Toussaint B., Goffaux M-J., Martinez M. et Oger R., 2004.** Base de données sols de REQUASUD. Deuxième synthèse. REQUASUD, Gembloux, Belgique, 36 p.

**Conesa H. M., Faz Á. and Arnaldos R., 2006.** Heavy metal accumulation and tolerance in plants from mine tailings of the semiarid Cartagena-La Union mining district (SE Spain). *Science of the Total Environment*, 366 (1), pp. 1-11.

**Coughtrey P. J. and Thorne M. C., 1983.** Radionuclides distribution and transport in terrestrial and aquatic ecosystems. Vol 2, AA Balkema (Eds), Rotterdam/Boston, pp. 321-424.

**CPCS, 1967.** Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. Classification des sols. Travaux CPCS 1963-1967, 100 p.

**Dalai T. K., Krishnaswami S. and Sarin M. M., 2002.** Major ion chemistry in the headwaters of the Yamuna river system: Chemical weathering, its temperature dependence and CO<sub>2</sub> consumption in the Himalaya. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 66, pp. 3397-3416.

**Darmendrail D., Baize D., Barbier J., Freyssinet P., Mouvet C., Salpéteur I. et Wavrer P., 2000.** Fond géochimique naturel : État des connaissances à l'échelle nationale-BRGM/RP-50158-FR. 93 p.

**Davies B. E. and Jones L. H. P., 1988.** Micronutrients and toxic elements, in Russell's Soil Conditions and Plant Growth, A. Wild, Ed., pp. 781-814.

**Decraene A. et Laruelle P., 1955.** Genèse et altération des latosols équatoriaux et tropicaux humides. Bull. agric. Congo Belge, XLVI, pp. 1113-1243

**Denaix L., 2007.** Transfert sol-eau-plante d'éléments traces dans les écosystèmes cultivés contaminés. Mémoire d'Habilitation à diriger des Recherches, Univ. de Pau et des Pays d'Adour, 117 p.

**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 de l'Institut National d'Agronomie Paris-Grignon, 106 p.

**Desbarats A. J., Parsons M. B., Percival J. B., Beauchemin S. and Kwong Y.T. J., 2011.** Geochemistry of mine waters draining a low-sulfide, gold-quartz vein deposit, Bralorne, British Columbia. Applied Geochemistry, 26, pp. 1990-2003.

**De Jayawardena U.S. and Izawa E., 1994.** A new Chemical Index of Weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a study from Sri Lanka. Engineering Geology 36, pp. 303-310.

**Dinon E. et Gerstmans A., 2008.** L'Influence du pH sur l'assimilation des éléments nutritifs du sol par les plantes et sur la variété des plantes. Université de Liège, département de chimie. Printemps des Sciences 2008, 4 p.

**Doelsch E., 2004.** Eléments traces métalliques. Inventaire pour l'île de la Réunion (Sols, déchets et végétaux). CIRAD, 11 p.

**Dorina P. and Micheal H. R., 2005.** Effect of alkaline pH and associated Zn on the concentration and total uptake of Cd by lettuce : Comparison with predictions from the CLEA model. *Science of Total Environment*, 347 (1-3), pp. 53-63.

**Doumbia S., 1997.** Géochimie, géochronologie et géologie structurale des formations birimiennes de la région de Katiola - Marabadiassa (Centre nord de la Côte d'Ivoire). Evolution magmatique et contexte géodynamique du Paléoproterozoïque. Thèse de Doctorat, Uni. Orléans. Mémoire du BRGM, n°276, 253 p.

**Driese S. G., Nordt L. C., Lynn W. C., Stiles C. A., Mora C. I. and Wilding L. P., 2005.** Distinguishing climate in the soil record using chemical trends in a vertisol climosequence from the Texas Coast Prairie, and application to interpreting Paleozoic paleosols in the Appalachian basin, USA. *J. Sediment. Res.* 75, pp. 339-349.

**Duchaufour P., 1956.** Pédologie – Applications forestières et agricoles. École Nationale des Eaux et Forêts, Nancy, 310 p.

**Duchaufour P., 1977.** Pédogenèse et classification. Tome 1, Paris, New York, Barcelone Milan, collection Masson, Paris, pp. 289-323.

**Duchaufour P., 2001.** Introduction à la science du sol : Sol, végétation, environnement. Dunod, Paris, 331 p.

**Dudka S. and Adriano D. C., 1997.** Environmental impacts of metal ore mining and processing: A review. *Journal of Environmental Quality*, 26, pp. 590-602.

**Düzgören-Aydin N. S., Aydin A. and Malpas J., 2002.** Re-assessment of chemical weathering indices: case study of pyroclastic rocks of Hong Kong. *Engineering Geology* 63, pp. 99-119.

**Düzgören-Aydin N. S. and Aydin A., 2003.** Chemical heterogeneities of weathered igneous profiles : implications for chemical indices. *Environmental and Engineering Geoscience* 9, 4, pp. 363-376.

**El Hamiani O., El Khalil H. et Boularbah A., 2010.** Evaluation de la toxicité des polluants métalliques par l'utilisation d'un biotest microbiologique metplate<sup>tm</sup>. *Rev. Microbiol. Ind. San et Environn*, Vol 4, N°1, pp. 69-81.

**Ernst W. H. O., 1996.** Bioavailability of heavy metals and decontamination of soils by plants. *Applied Geochemistry*, 11(1-2), pp. 163-167.

**Escadafal R., Girard M.C. et Courault D., 1988.** La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie*, 8 (2), pp. 147-154.

**Faillat J. P., 1987.** Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest). *Hydrogéologie*, n° 2, pp. 109-112.

**FAO, 2006.** World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. *World soil resources reports*, 103, 145 p.

**FAO, 2007.** Guidelines and computer program for the planning and design of land drainage system. Annex 1: Estimating soil hydrological characteristics from soil texture. *FAO irrigation and drainage paper*, 62, pp. 115-117.

**Feng X., Wang Y., Chen L., Fu B. and Bai G., 2010.** Modelling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 118, pp. 239-248.

**Fernandez-Cornudet C., 2006.** Devenir du Zn, Pb et Cd issus de retombées atmosphériques dans les sols, à différentes échelles d'étude. Influence de l'usage des sols sur la distribution et la mobilité des métaux. Thèse de Doctorat de L'INA-PG, 171 p.

**Fernandez-Ulgade O., Barre P., Hubert F., Virto I., Girardin C., Ferrage E., Caner L. et Chenu C., 2012.** Dans quelle mesure la minéralogie des argiles affecte-t-elle l'agrégation du sol ? Résultats d'une étude menée dans un sol soumis à des usages différents. 11<sup>èmes</sup> journées d'étude des sols, Actes du colloque : Le sol face aux Changements globaux, Communication orale, (p 30), Versailles, 445 p.

**FIDA, 2002.** La gestion de l'environnement et des ressources naturelles, une préoccupation croissante du FIDA. Département gestion des programmes. Équipe publications, Rome, Italie, 24 p.

**Figueira R. and Ribeiro T., 2005.** Transplants of aquatic mosses as biomonitors of metals released by a mine effluent. *Environmental Pollution*, 136(2), pp. 293-301.

**Gaucher G., 1981.** Traité de pédologie agricole. Tome II : Les facteurs de la pédogenèse. G. Lelotte Editions, Dison, 730 p.

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

**Géomines, 1982.** Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Carte de Gagnoa, Cahier n° 24, République de Côte d'Ivoire, Ministère des Travaux publics et des transports, Direction centrale de l'hydraulique, 30 p.

**Gobat J., Aragno M. et Matthey W., 2003.** Le sol vivant, deuxième édition revue et augmentée. Presse polytechniques et universitaires romandes, 568 p.

**Goldschmidt V. M., 1958.** Geochemistry. The international series of monographs on physics. Oxford University Press, London, 730 p.

**Goldsmith S. T., Carey A. E., Lyons W. B. and Hicks D. M., 2008.** Geochemical fluxes and weathering of volcanic terrains on high standing islands: Taranaki and Manawatu-Wanganui regions of New Zealand. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 72, pp. 2248-2267.

**Gómez-Álvarez A., Villalba-Atondo A.I., Acosta-Ruiz G., Castañeda-Olivares M. y Kamp D., 2004.** Metales pesados en el agua superficial del Río San Pedro durante 1997 y 1999. *Rev. Internat. Contam. Ambient.* 20 (1), pp. 5-12.

**Gómez-Álvarez A., Meza-Figueroa D., Villalba-Atondo A.I., Valenzuela-García J., Ramírez Hernández J. y Ochoa-Ortega G., 2008.** Estimation of potential pollution from mine tailings in the San Pedro River (1993–2005), México–US Border. *Environ. Geol.*, doi : 10.1007/s00254-008-1424-8.

**Gómez-Álvarez A., Valenzuela-García J. L., Meza-Figueroa D., O-Villanueva M., Ramírez-Hernández J., Almendariz-Tapia J. y Pérez-Segura E., 2012.** Impact of mining activities on sediments in a semi-arid environment: San Pedro River, Sonora, Mexico. *Appl. Geochem.* 26, pp. 2101-2112.

**Goutal N., Brêthes A. et Ranger J., 2012.** Impact de la circulation d'un porteur sur deux sols forestiers et son évolution naturelle pendant trois à quatre ans. 11<sup>èmes</sup> journées d'étude des sols, Actes du colloque : Le sol face aux Changements globaux, Communication orale, (pp 24-25), Versailles, 445 p.

**Grandin G., 1976.** Aplanissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'ouest. *Mém. ORSTOM* 82, 275 p.

**Grandin G. et Perseil E. A., 1983.** Les Minéralisations Manganésifères Volcano-sédimentaires du Blafo-Guétó (Côte d'Ivoire) - Paragenèses - Altération Climatique. *Mineral. Deposita* 18, pp. 99-111.

**Gray L. and Morant P., 2003.** Reconciling indigenous knowledge with scientific assessment of soil fertility changes in southwestern Burkina Faso. *Geoderma*, 111, pp. 425-437.

**Hamon R., McLaughlin M., Gilkes R., Rate A., Zarcinas B., Robertson A., Cozens G., Radford N. and Bettenay L., 2004.** Geochemical indices allow estimation of heavy metal background concentrations in soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 18, pp. 1-6.

**Henin S., 1983.** Les éléments traces dans les sols. *Sci. du sol*, 2, pp. 67-71.

**Herron M. M., 1988.** Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sed. Petrol.* 58, pp. 820-829.

**Hettiarachchi G. M. and Pierzynski G. M., 2002.** *In situ* stabilization of soil lead using phosphorus and manganese oxide: influence of plant growth. *Journal of Environmental Quality*, 31, pp. 564-572.

**Hugues C. J., 1973.** Spilites, keratophyres, and the igneous spectrum. *Geological Magazine*, 109, pp. 513-527.

**INERIS, 2006.** Eléments traces métalliques. Guide méthodologique. Recommandation pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines. Rapport d'étude n° INERIS-DRC-06-66246/DESP-R01a, 119 p.

**Isbell R. F., 2002.** The Australian Soil Classification (revised edition). Collingwood, Victoria : CSIRO publishing, 144 p.

**Jambon A. et Thomas A., 2009.** Collection: Sciences Sup. Dunod, 416 p.

**Kabala C. and Szerszen L., 2002.** Profile distribution of lead, zinc, and copper in Dystric Cambisols developed from granite and gneiss of the Sudetes Mountains in Poland. *Water, Air and Soil Pollution*, 138, pp. 307-317.

**Kabata-Pendias A., 1994.** Biogeochemistry of arsenic and selenium. *In* : Arsenic and selenium in the environment : ecological and methodical aspects, ZN PAN Czlowiek i Srodowisko, vol. 8. ZN PAN : Warszawa, pp. 9-16.

**Kabata-Pendias A. and Pendias H., 1992.** Trace elements in soils and plants, 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 195-203.

**Kabata-Pendias A. and Pendias H., 2001.** Trace elements in soils and plants, 3<sup>rd</sup> ed. CRC Press, Boca Raton, FL, 413 p.

**Kabata-Pendias A. and Sadurski W., 2004.** Trace elements and compounds in soil. *In* : Elements and their compounds in the environment. Eds. Merian, Anke, Ihnat et Stoeppler, 2<sup>ème</sup> edition, Wiley-VCH Weinheim (D), Vol. 1, General aspects, pp. 79-99

**Kartal S., Aydın Z. and Tokaloglu S., 2006.** Fractionation of metals in street sediment samples by using the BCR sequential extraction procedure and multivariate statistical elucidation of the data. *J. Hazard. Mater.*, 132, pp. 80-89.

**Kelly M. and Thorne M., 2003.** Radionuclides handbook. R&D Technical report P3-101/SP1b, Environment Agency, Bristol, UK, 211 p.

**Kilian J., 1972.** Les inventaires morphopédologiques, conceptions, applications au développement agricole. *L'Agronomie Tropicale*, 27, pp. 930-938.

**Kojima M., 1962.** Relationships between soil colour and iron minerals contained in the soil. *J. Sci. Soil, Manure, Tokyo*, 33, pp. 311-316.

**Konate L., 1998.** Etude du fonctionnement d'une exploitation agricole : cas de la ferme de l'INP-HB de Yamoussoukro. Rapport de fin de 1<sup>ère</sup> année agronomique, DAG, pp. 3-8.

**Koné B., 2006.** La couleur comme indicateur 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 unique de Doctorat en Sciences de la Terre, Spécialité : Pédologie. Université de Cocody/UFR STRM, 149 p.

**Koné B., Sitapha D., Oikeh S., Yoro G., Camara M., Djidji D. D. et Assa A., 2009a.** Estimation de la fertilité potentielle des ferralsols par la couleur. *Can. J. Soil Sci.* 89: pp. 331-342.

**Kone B., Yao-Kouame A., Ettien J.B., Oikeh S., Yoro G. and Diatta S., 2009b.** Modelling the relationship between soil color and particle size for soil survey in Ferralsol environments. *Soil & Environ.*, 28(2), pp. 93-105.

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

**Kouakou Y. K. N., Yao G. F., Nangah K. Y., Baka D., Adingra A. et Yao-Kouamé A., 2013b.** Caractères macromorphologiques des sols développés sur fonds volcano-sédimentaire au *Blafo-Guétó* (Toumodi) dans le centre-sud de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal* vol.9, N°9, pp. 18-30.

**Kubiena W. L., 1956.** Red earth formation and laterization (their differentiation by micromorphological characteristics). *Congr. Int. Sci. Sol.* 6. 1956. Paris, E, pp. 247-249.

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

**Leblond P., 1984.** Contribution aux études hydrogéologiques en Côte d'Ivoire. Région de Yamoussoukro (Station expérimentale de l'ENSTP). Thèse de 3<sup>e</sup> cycle de l'Université de Bordeaux 1, France, n° d'ordre 2015, 150 p.

**Legros J. P., 1973.** Précision des cartes pédologiques. *SdS*, vol. 2, pp. 115-128.

**Legros J. P., 2007.** Les grands sols du monde. Sciences et technologie de l'environnement, 1<sup>ère</sup> édition, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sciences de la Terre, 574 p.

**Leonard A. N., 2011.** The implications of global climate change for fisheries management in the Caribbean. *Climate and Development*, 3, pp. 228-241.

**Li P., Feng X., Shang L., Qiu G., Meng B., Liang P. and Zhang H., 2008.** Mercury pollution from artisanal mercury mining in Tongren, Guizhou, China. *Appl. Geochem.* 23, pp. 2055-2064.

**Lide D. R., 1999.** Handbook of chemistry and physics. 79<sup>th</sup> Edition 1998-1999. Chemical Rubber Company (CRC) press, Florida, USA, 2496 p.

**Lin C., Wu Y., Lu W., Chen A. and Liu Y., 2007.** Water chemistry and ecotoxicity of an acid mine drainage affected stream in subtropical China during a major flood event. *Journal of Hazardous Materials*, 142, pp. 199-207.

**Lions J., 2004.** Etude hydrogéochimique de la mobilité de polluants inorganiques dans des sédiments de curage mis en dépôt : expérimentations, études *in situ* et modélisation. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 248 p.

**Lopez-Sanchez J. F., Rubio R., Samitier C. and Rauret G., 1996.** Trace metal partitioning in marine sediments and sludges deposited of the coast of Barcelona (Spain). *Water Res.*, 30 (1), pp. 153-159.

**Loué A., 1993.** Oligo-éléments en agriculture. 2<sup>ème</sup> édition. Editions Nathan, Paris, 577 p.

**Manceau A., Marcus M. A. and Tamura N., 2002.** Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques. *In Applications of Synchrotron Radiation in Low-Temperature Geochemistry and Environmental Science. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Mineralogical Society of America, 49, pp. 341-428.

**Makino T., Luo Y., Wu L., Sakurai Y., Maejima Y., Akahane I. and Arao T., 2010.** Heavy metal pollution of soil and risk alleviation methods based on soil chemistry, *Pedologist*, pp. 38-49.

**Markus J. A. and Mabratney A. B., 1996.** An urban soil study: heavy metals in Glebe, Australia. *Soil Research*, 34, pp. 453-465.

**Maslov A. V., Ronkin Yu. L., Krupenin M. T., Gareev E. Z., and Lepikhin O. P., 2003.** Provenances of riphean sedimentary basins at the Russian platform–southern Urals Junction : evidence from petrographic, petrochemical and geochemical data. *Dokl. Earth Sci.* 389 (2), pp. 180-183.

**Maslov A. V., Nozhkin A. D., Podkovyrov V. N., Letnikova E. F., Turkina O. M., Ronkin Yu. L., Krupenin M. T., Dmitrieva N. V., Gareev E. Z., Lepikhina O. P., and Popova O. Yu., 2008.** Riphean fine-grained aluminosilicate clastic rocks in the Southern Urals, Uchur Maya Area and the Yenisei Kryazh : principal litho-geochemical characteristics. *Geochem. Int.* 46 (11), pp. 1117-1144.

**Mauricio P. and Ildeu A., 2005.** Color attributes and mineralogical characteristics, Evaluated by radiometry of highly weathered tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69, pp. 1162-1172.

**McBride M., Sauvé S. and Hendershot W. H., 1997.** Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *Eur. J. Soil Sci.*, 48, pp. 337-346.

**McLaughlin M. J., Parker D. R. and Clarke J. M., 1999.** Metals and micronutrients-food safety issues. *Field Crops Research*, 60, pp. 143-163.

**Miller J. R., Hudson-Edwards K. A., Lechler P. J., Preston D. and Macklin M. G., 2004.** Heavy metal contamination of water, soil and produce within riverine communities of the Rio Pilcomayo basin, Bolivia. *Sci. Total Environ.* 320, pp. 189-209.

**Millot G., 1963.** Géologie des argiles. Editions Masson, Paris, 499 p.

**Morales L. A. and Ferreiro J. P., 2009.** Geostatistical analysis of pH and redox potential (Eh) variability over a rice field in successive crop stages. Estudios en la zona no saturada del suelo. Vol IX, 8 p.

**Mullana D., Favis-Mortlockb D. and Fealy R., 2012.** Addressing key limitations associated with modelling soil erosion under the impacts of future climate change. Agricultural and Forest Meteorology, 156, pp. 18-30.

**Mun C., 2007.** Etude du comportement du produit de fission ruthénium dans l'enceinte de confinement d'un réacteur nucléaire, en cas d'accident grave. Thèse de doctorat en Sciences, spécialité « Chimie-Radiochimie », Université de Paris-XI, France, N° d'ordre : 8630, 162 p.

**Mwegoha W. J. S. and Kihampa C., 2010.** Heavy metal contamination in agricultural soils and water in Dar es Salaam city, Tanzania, Afri. J. Environ. Sci. Tech., 4(11), pp. 763-769.

**Nangah K. Y., Angui K. T. P., Kouakou Y. K. N., Rusu E., Yao-Kouame 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, Vol. 2, N°4, pp. 372-383.

**Navarro M. C., Perez-Sirvent C., Martinez-Sanchez M. J., Vidal J., Tovar P. J. and Bech J., 2008.** Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone. Journal of Geochemical Exploration, 96, pp. 183-193.

**Nesbitt H. W. and Young G. M., 1982.** Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature 299, pp. 715-717.

**Nesbitt H. W. and Markovics G., 1997.** Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. Geochimica Et Cosmochimica Acta 61, pp. 1653-1670.

**N'Guessan K. E., 1990.** Etude de l'évolution de la végétation du « V Baoulé » (contact forêt/savane en Côte d'Ivoire) par télédétection. Télédétection et sécheresse. Ed. AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext, Paris, pp. 181-196.

**Notling R. F., Maarten V. D. and Helder W., 1996.** Distribution of trace and major elements in sediments and pore waters of the Lenda Delta and Laptev sea. Mar. Chem., Elsevier, pp. 285-299.

**Ohta T. and Arai H., 2007.** Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering. Chemical Geology 240, pp. 280-297.

**Oluwatosin G. A., Adeyolanu O. D., Dauda T. O. and Akinbola G. E., 2008.** Levels and geochemical fractions of Cd, Pb and Zn in valley bottom soils of some urban cities in South-Western Nigeria. *African Journal of Biotechnology*, 7 (19), pp. 3455-3465.

**Osbah H. et Allan C., 2003.** Indigenous knowledge of soil fertility management in southwest Niger. *Geoderma*, 111, pp. 457-479.

**Pais I. and Benton J. J., 2000.** The handbook of Trace Elements. Boca Raton, FL, St. Lucie Press, 223 p.

**Papafilippaki A., Gasparatos D., Haidouti C. and Stavroulakis G., 2007.** Total and bioavailable forms of Cu, Zn, Pb and Cr in agricultural soils : a study from the hydrological basin of Keritis, Chania, Greece. *Global NEST Journal*, Vol 9, N°3, pp 201-206.

**Pardini G., Gispert M. and Dunjó G., 2004.** Distribution patterns of soil properties in rural Mediterranean Area in Northeastern Spain. *Mountain Research and Development*, 24 (1), pp. 44-51.

**Parriaux A., 2006.** Géologie : bases pour l'ingénieur. 1<sup>ère</sup> édition, Presses polytechniques et universitaires romandes, 536 p.

**Pedro G., 1966.** Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle aluminosilicique). *C. R. Ac. Sc.*, 262, pp. 1828-1831.

**Pereira B. et Sonnet P., 2007.** La contamination diffuse des sols par les éléments traces métalliques en région Wallonne. Dossier scientifique sur l'état de l'environnement Wallon. Etudes-Expertises, UCL, Belgique, 27 p.

**Perraud A., 1971.** Les sols. *In* Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. ORSTOM, n° 50, pp. 269-391.

**Perrono P., 1999.** Les micropolluants métalliques des boues de stations d'épuration urbaine et l'épandage agricole. *Mém. D.U.E.S.S. Eau et Environnement, D.E.P., Univ. Picardie, Amiens*, 100 p.

**Pierce F. J., Dowdy R. H. and Grigal D. F., 1982.** Concentrations of six trace metals in some major Minnesota soil series. *J Environ Qual*, 11, pp. 416-412.

**Plice J. M., 1943.** Factors affecting soil colors. *Okfa. Acad. Sci. Proc. Prog. Rept.*, 23, pp. 49-51.

**PNUE, 2002.** Evaluation mondiale du mercure. PNUE-substances chimiques, Genève, Suisse, 292 p.

- Pomerol C. et Renard M., 1998.** *Eléments de géologie*. 11<sup>ème</sup> édition, Masson, 629 p.
- Potter P. E., 1978.** Petrology and chemistry of modern big river sands. *J. Geol.* 86, pp. 423-449.
- Pouclet A., Vidal M., Delor C., Simeon I. et Alric G., 1996.** Le volcanisme birimien du nord-est de la Côte d'Ivoire, mise en évidence de deux phases volcano-tectoniques distinctes dans l'évolution géodynamique du Paléoprotérozoïque. *Bulletin Société Géologique de France*, 3 (167), pp. 307-319.
- Pouliotte J., Smit B. and Westerhoff L. 2009.** Adaptation and development: livelihoods and climate change in Subarnabad, Bangladesh. *Climate and development*, pp. 31-46.
- Price J. R. et Velbel M. A., 2003.** Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology* 202, pp. 397-416.
- Pruvot C., Douay F., Herve F. and Waterlot C., 2006.** Heavy metals in soil, crops and grass as a source of human exposure in the former mining areas. *Journal of Soils and Sediments*, 6, pp. 215-220.
- Qiu G., Feng X., Meng B., Sommar J. and Gu C., 2012.** Environmental geochemistry of an active Hg mine in Xunyang, Shaanxi Province, China. *Appl. Geochem*, 27, pp. 2280-2288.
- Qiu G., Feng X., Wang S. and Shang L., 2005.** Mercury and methylmercury in riparian soil, sediments, mine-waste calcines, and moss from abandoned Hg mines in east Guizhou province, southwestern China. *Appl. Geochem.* 20, pp. 627-638.
- Qiu G., Feng X., Wang S. and Shang L., 2006a.** Environmental contamination of mercury from Hg-mining areas in Wuchuan northeastern Guizhou, China. *Environ. Pollut.* 142, pp. 549-558.
- Qiu G., Feng X., Wang S. and Xiao T., 2006b.** Mercury contaminations from historic mining to water, soil and vegetation in Lanmuchang, Guizhou, southwestern China. *Sci. Total Environ.* 368, pp. 56-68.
- Rajamani V., Tripathi J. K. and Malviya V. P., 2009.** Weathering of lower crustal rocks in the Kaveri river catchment, southern India : Implications to sediment geochemistry. *Chemical Geology*, 265, pp. 410-419.
- Ramos Arroyo Y. R. and Siebe C., 2007.** Weathering of sulphide minerals and trace element speciation in tailings of various ages in the Guanajuato mining district, Mexico. *Catena* 71, pp. 497-506.

- Ramos L., Gonzales M. J. and Hernandez L. M., 1994.** Sequential extraction of copper, lead, cadmium and zinc in sediments from Ebro river (Spain) : relationship with levels detected in earthworms. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 62, pp. 301-308.
- Rattan R. K., Datta S. P., Chhonkar P. K., Suribabu K. and Singh A. K., 2005.** Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater a case study. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 109, pp. 310-322.
- Raunet M., 2008.** Initiation à la lecture des paysages morphopédologiques de Madagascar. Formation des ingénieurs et techniciens des opérateurs du projet bvpi/sehp, 58 p.
- Reimann C., Filzmoser P. and Garrett R., 2002.** Factor analysis applied to regional geochemical data : problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 17, pp. 185-206.
- Rigopoulos I., Tsikouras B., Pomonis P. and Hatzipanagiotou K. 2010.** The influence of alteration on the engineering properties of dolerites: The examples from the Pindos and Vourinos ophiolites (northern Greece). *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 47, pp. 69-80.
- Roque J., 2007.** Carte pédologique de France à moyenne échelle. Feuille Meaux. Notice explicative. INRA Orléans, 196 p.
- Roser B. P. and Korsch R. J., 1986.** Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio. *J. Geol.* 94 (5), pp. 635-650.
- Roser B. P. and Korsch R. J., 1988.** Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data. *Chem. Geol.* 67, pp. 119-139.
- Rossi G., 1989.** Exemples de morphopédologie tropicale. *Soltrop* 89, Paris: ORSTOM, pp. 87-105.
- Ruhe R. V. and Walker P. H., 1968.** Hillslope models and soil formation: 1. Open systems. *Trans. Int. Cong. Soil Sci.* 9<sup>th</sup>, 4, pp. 551-560.
- Saidi N., Brhada F., Zaïd A., Bouabdli A. et Escarré J., 2002.** Impact de la mine d'Aouli sur l'écosystème au niveau de la Haute Moulouya (Maroc). *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, 138, pp. 21-27.
- Salinas Villafane O. R., Igarashi T., Kurosawa M. and Takase T., 2012.** Comparison of potentially toxic metals leaching from weathered rocks at a closed mine site between laboratory columns and field observation. *Applied Geochemistry*, 27, pp. 2271-2279.

**Salminen R. and Tarvainen T., 1997.** The problem of defining geochemical baselines. A case study of selected elements and geological materials in Finland. *Journal of Geochemical Exploration*, 60, pp. 91-98.

**Schäfer U., 2004.** Manganese. *In* : Elements and their compounds in the environment. Eds. Merian, Anke, Ihnat et Stoeppler, 2<sup>ème</sup> édition, Wiley-VCH Weinheim (D), Vol. 2, Metals and their compounds, pp. 901-930.

**Sebei A., Chaabani F. et Ouerfelli M. K., 2005.** Impacts des rejets miniers sur le sol et les plantes de la région de Boujaber (Nord-Ouest Tunisie). Fractionnement chimique des métaux lourds dans les sols. *Geo-Eco-Trop*, 29, pp. 37-50.

**Ségalen P., 1969.** Contribution à la connaissance de la couleur des sols a sesquioxydes de la zone intertropicale : sols jaunes et sols rouges. *cah. O.R.S.T.O.M., ser., pedol., vol. VII, n° 2*, pp. 225-236.

**Sharma A. and Rajamani V., 2000.** Weathering of gneissic rocks in the upper reaches of Cauvery river, south India: implications to neotectonics of the region. *Chemical Geology* 166, pp. 203-223.

**Sharma A. and Rajamani V., 2001.** Weathering of charnockites and sediment production in the catchment area of the Cauvery River, southern India. *Sedimentary Geology* 143, pp. 169-184.

**Shaw S. A., Hendry M. J., Essilfie-Dughan J., Kotzer T. and Wallschläger D., 2011.** Distribution, characterization, and geochemical controls of elements of concern in uranium mine tailings, Key Lake, Saskatchewan, Canada. *Applied Geochemistry* 26, pp. 2044-2056.

**Sigg L., Behra P. et Stumm W., 2000.** Chimie des milieux aquatiques. 3<sup>ème</sup> édition, Dunod, France, 567 p.

**Singh M., Sharma M. and Tobschall H. J., 2005.** Weathering of the Ganga alluvial plain, northern India: implications from fluvial geochemistry of the Gomati River. *Appl. Geochem.* 20, pp. 1-21.

**Singh P., 2009.** Major, trace and REE geochemistry of the Ganga River sediments: Influence of provenance and sedimentary processes. *Chemical Geology* 266, pp. 251-264.

**Smirnova Yu. N., Sorokin A. A., Popeko L. I. and Smirnov Yu. V., 2013.** Geochemistry of paleozoic terrigenous sediments from the Oldoi Terrane, Eastern Central Asian orogenic belt, as an indicator of geodynamic conditions during deposition. *Geochemistry International*, Vol. 51, No. 4, pp. 306-325.

**Soltner D., 1992.** Les bases de la production végétale : le sol. Collection sciences et technique agricoles, Tome 1, 467 p.

**Sørensen H., 1974.** The alkaline rocks. Wiley-Interscience publication, 622 p.

**Sparks D., 1995.** Environmental soil chemistry. San Diego, 267 p.

**Tagini B., 1971.** Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai géotechnique régional, Thèse de Doctorat Univ. Fac. Des Sci. Lausanne (Suisse), et, SODEMI, Abidjan, 302 p.

**Taylor S. R. and McLenan S. M., 1985.** The Continental Crust : Its Composition and Evaluation. Blackwell Scientific, London, U. K., pp. 365-382.

**Teissier J., 1974.** Terroir de Mogtedo (Haute-Volta). Etude morphopédologique en vue de la mise en valeur des terres. L'Agronomie Tropicale, 29, pp. 312-363.

**Thibout F., 1974.** Interactions morphogénèse, pédogénèse. Exemple d'application dans la région de Bechloul (Algerie). L'Agronomie Tropicale, 29, pp. 300-311.

**Thomassone R., Dervin C. et Masson J. P., 1993.** Biométrie : modélisation des phénomènes biologiques. 2<sup>ème</sup> tirage, Masson, Paris, pp. 131-155.

**Tricart J., 1974.** De la géomorphologie à l'étude écographique intégrée. L'Agronomie Tropicale, 29, pp. 122-132.

**Turnewitsch R., Reyss J. L., Chapman D. C., Thomson J. and Lampitt R. S., 2004.** Evidence for a sedimentary fingerprint of an asymmetric flow field surrounding a short seamount. Earth Planet. Sci. Lett. 222, pp. 1023-1036.

**USDHHS, 2007.** Toxicological profile for lead. United States Department of health and human services. Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology and Environmental Medicine / Applied Toxicology Branch, Atlanta, Ga, USA, 528 p.

**Valentin C. et Janeau L., 1989.** Les risques de dégradation structurale de la surface des sols en savane humide (Côte d'Ivoire). Cah. ORSTOM, sér. Pédol. 25 (1-2), pp. 41-52.

**Van der Perk M., 2006.** Soil and Water Contamination, from molecular to catchment scale. Taylor & Francis, 1 Edition, 404 p.

**Vaudour J., 1968.** Les sols méditerranéens. Annales de géographie, 77 (422), pp. 483-488.

**Véhi T., 2001.** Rapport annuel 2000. Direction régionale des lacs, Yamoussoukro (Tiébissou, Toumodi, Yamoussoukro), 93 p.

**Violette A., 2010.** Processus et Bilans d'altération en milieu tropical (bassin versant de *Mule Hole*, Inde du Sud) : Sensibilité à la composition Minéralogique et au Climat. Thèse de

doctorat de l'université de Toulouse III - Paul Sabatier, spécialité : Géochimie de la Surface, 374 p.

**Waegemans G. et Henry S., 1954.** La couleur des latosols en relation avec leurs oxydes de fer. Congr. Int. Sci. Sol. 5., Léopoldville, II, pp. 384-389.

**Walling D. E., Collins A. L. and Sichingabula H. M., 2003.** Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small Zambian catchment. *Geomorphology* 52, pp. 193-213.

**Wedepohl K. H., 1995.** The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, pp. 1217-1232.

**Wong S., Li X., Zhang G., Qi S. and Min Y., 2002.** Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River delta, South China. *Environmental Pollution*, 119, pp. 33-44.

**WRB, 2006.** World Reference Base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. 2<sup>nd</sup> edition, World soil resources reports, n°103, FAO, Rome, 128 p.

**Wronkiewicz D. J. and Condie K. C., 1987.** Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source-area weathering and provenance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, pp. 2401-2416.

**Yacé I., 1982.** Etude géologique du volcanisme Eburnéen dans les parties centrales et méridionales de la chaîne précambrienne de Fètèkro, République de Côte d'Ivoire, Ministère des Mines, Direction de la Géologie, 1982, 150 p.

**Yao G. F., 2006.** Caractérisation physico-chimique des sols brunifiés de Kanhankro (Toumodi) : étude d'une toposéquence. Mémoire de Maîtrise PVE, Université d'Abobo-Adjamé, 60 p.

**Yao-Kouamé A., 2007a.** Nature des éléments grossiers observés dans les sols brunifiés dérivés de matériaux du complexe volcano-sédimentaire de Toumodi - Kanhankro en moyenne Côte d'Ivoire. *Rev. CAMES- Série A*, Vol. 05, pp. 39-52.

**Yao-Kouamé A., 2007b.** Caractéristiques physiques des sols brunifiés dérivés des formations du complexe volcano-sédimentaire de Kanhankro (Toumodi) en moyenne Côte d'Ivoire. *Rev. CAMES- Série A*, Vol. 05, pp. 76-86.

**Yao-Kouamé A., 2008.** Etude des sols brunifiés dérivés des matériaux du complexe volcano-sédimentaire de Toumodi en moyenne Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'état ès-sciences Naturelles. Université de Cocody/UFR STRM, 219 p.

**Yao-Kouamé A., Yao G. F., Alui K. A., N'Guessan K. A., Tiemoko T. P. et Kloman Y. K., 2008.** Etude morphopédologique du bassin versant du mont *Blanguand* dans le massif du *Yaouré* en région centre de la Côte d'Ivoire. *Afrique Science* 04 (3), pp. 426-451.

**Yao-Kouamé A., Koné B. et Gala Bi T. J., 2011.** Caractérisation morpho-pédologique des sols bruns eutrophes développés sur les complexes volcano-sédimentaires ouest africains du birimien à Blafo en Côte d'Ivoire. *Africa Geoscience Review*, Vol. 18, N°1, pp. 23-32.

**Yıldız A., Kuşcu M., Dumlupınar İ., Arıtan A. E. and Bağcı M., 2010.** The determination of the mineralogical alteration index and the investigation of the efficiency of the hydrothermal alteration on physico-mechanical properties in volcanic rocks from Köprülü, Afyonkarahisar, West Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69 (1), pp. 51-61.

**Yoboué K. E., 2005.** Caractérisation des oxydes et des hydroxydes des sols brunifiés de Kahankro (Toumodi) : étude de deux toposéquences. DEA université de Cocody, UFR Sciences de la terre et des ressources minières, laboratoire de pédologie et géologie appliquée, 69 p.

**Yoboué K. E., Yao-Kouamé A., 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*, Vol.40, N°1, pp. 60 -72.

**Yoro G., 2002.** La pédologie pour une gestion durable des sols. Cours d'initiation pour les agents des caisses de stabilisation et de péréquation du Gabon. Document interne du CNRA, Abidjan, 24 p.

**Younger P. L., Banwart S. A. and Hedin R. S., 2002.** Mine Water : Hydrology, Pollution, Remediation. Environmental pollution, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 442 p.

**Zhang J., Quine A. T. and Ni S. G., 2006.** Stock and dynamics of SOC in relation to soil redistribution by water and tillage erosion. *Glob. Change Biol.*, 12, pp. 1834-1841.

**Zhao F., McGrath S. and Merrington G., 2007.** Estimates of ambient background concentrations of trace metals in soils for risk assessment. *Environmental Pollution*, 148, pp. 221-229.

**Zhou H. Y., Cheung R. Y. H., Chan K. M. and Wong M. H., 1998.** Metal concentrations in sediments and tilapia collected from inland waters of Hong Kong. *Water Res.*, 32 (11), pp. 3331-3340.

**Zhou J. M., Dang Z., Cai M. F. and Liu C. Q., 2007.** Soil heavy metal pollution around the Dabaoshan mine, Guangdong province, China. *Pedosphere*, 17, pp. 588-594.

### **Références internet**

**Bédard P., 2009.** Clef d'identification des minéraux. La *goethite*.  
<http://www.groupes.polymtl.ca/glq1100/mineraux/goethite/goethite.html>, Consulté le 30/05/2013.

**Pereck S., 2013.** Les éléments chimiques. <http://www.elementschimiques.fr/?fr/elements>, consulté le 03/06/2013.

# **ANNEXES**

ANNEXE 1		Fiche de description du profil B1									
Date : 29/08/2010		Lieu : Blafo		Feuille : Gagnoa 4d		Profil : B1		Roche : ?		Utilisation du sol : Jachère	
Pente : 0		Position topographique : sommet		Végétation : savane arbustive		Micro relief : plateau		Type de sol : Sol brunifié, remanié, rajeuni à faciès induré			
								(Cambisol pisoplinthique)			
Profondeur		0 - 5		5 - 20		20 - 39		39 - 70			
Couleur		Humidité		Sec		Sec		Sec		Sec	
		Matière organique		Brun 7,5YR 3/2		Brun rougeâtre 5YR 4/3		BRT 5YR 4/4 Tâches : OO 2,5YR 4/6, OJ 7,5YR 5/6		Légèrement humifère BRB 2,5YR 3/4 Tâches : OJ 10Y 7/8, OR 10R 6/8	
Texture		% argile		SLA à sable fin et moyen		15 à 20 %		ASL à sable moyen et grossier		20 à 35 %	
% éléments grossiers		% quartz		69,23		84,62		83,33		71,33	
		% concrétions et nodules									
		% autres éléments									
Structure générale		Taille		Grumeleuse au niveau des racines		mm à cm		Grumeleuse au niveau des racines		mm à cm	
Structure du débit		Taille		Grumeleuse au niveau des racines		mm à cm		Grumeleuse au niveau des racines		mm à cm	
Cohésion générale		Cohésion agrégat		Cohérent		Cohérent		peu cohérent		peu cohérent	
Porosité générale		Taille		très poreux		mm		très poreux		mm	
Abondance des racines		Taille		très nombreuses racines		mm		nombreuses racines		mm à cm	
Orientation des racines		Classe de drainage		Subhorizontale		1,8		Subhorizontale		1,6	
Transition		Limite		progressive		± régulière		progressive		± régulière	
Contraintes		Contrainte				charge en éléments grossiers				charge en éléments grossiers	
Type d'horizon				A <sub>11</sub>				A <sub>12</sub>			
								B <sub>1</sub> (C) g			
										B <sub>2</sub> (C)	

<b>ANNEXE 2</b>		<b>Fiche de description du profil B2</b>									
<b>Date :</b> 29/08/2010		<b>Lieu :</b> Blafo		<b>Feuille :</b> Gagnoa 4d		<b>Profil :</b> B2		<b>Roche :</b> ?		<b>Utilisation du sol :</b> Jachère	
<b>Pente :</b>		<b>Position topographique :</b> haut de versant		<b>Végétation :</b> savane arbustive		<b>Micro relief :</b> pente		<b>Type de sol :</b> Sol brunifié, remanié, rajeuni			
(Cambisol manganiférique)											
Profondeur		0 - 7		7 - 20		20 - 50		50 - 60		<b>60 - 100</b>	
Couleur	Humidité	Brun Sombre 5YR 3/2	Sec	BRT 2,5YR 2,5/2 Tâches : JV 7,5YR 6/4	Sec	BRT 10YR 3/1, Tâches : JO 7,5YR 4/6, JV 10R 3/2	frais à sec	BRT 10R 4/4. Tâches : J 7,5YR 5/6	frais à sec	BRT 10YR 3/4 Tâches : JO 7,5YR 5/8	frais à sec
	Matière organique		Humifère		Humifère		Légèrement humifère		Apparement non humifère		Apparement non humifère
Texture	% argile	ALS à sable moyen	20 à 25 %	ALS à sable moyen et fin	30 à 35 %	ASL	45 à 50 %	ASL à sable fin et moyen	50 à 60 %	ASL à sable fin et moyen	70%
% éléments grossiers	% quartz	70	< 1%	83,33	< 1%	80	< 1%	78,57	< 1%	65	< 1%
	% concrétions et nodules		> 30 %		> 30 %		> 30 %		> 30 %		> 30 %
	% autres éléments										
Structure générale	Taille	Grumeleuse	mm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	mm à cm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	mm à cm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm
Structure du débit	Taille	Grumeleuse	mm	polyédrique	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm
Cohésion générale	Cohésion agrégat	Cohérent	Cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent
Porosité générale	Taille	poreux	mm	peu poreux	mm	peu poreux	mm	peu poreux	mm	peu poreux	mm
Abondance des racines	Taille	nombreuses chevelures racinaires	mm	nombreuses chevelures	mm	peu de racines	mm	quelques racines	mm	quelques racines	mm
Orientation des racines	Classe de drainage	Subhorizontale	1,8	Subhorizontale	2,2	Subhorizontale	4,5	Subverticale	4	Subverticale	5,5
Transition	Limite	progressive	± régulière	progressive	ondulée	progressive	± régulière	progressive	± régulière	progressive	± régulière
Contraintes	Contrainte	profondeur		éléments grossiers		éléments grossiers, mauvais drainage		éléments grossiers, mauvais drainage		éléments grossiers, mauvais drainage	
Type d'horizon		A <sub>1</sub>		AB(C)		B <sub>1</sub> (C)		B <sub>2</sub> (C)		C	

<b>ANNEXE 3</b>		<b>Fiche de description du profil B3</b>											
<b>Date :</b> 29/08/2010		<b>Lieu :</b> Blafo		<b>Feuille :</b> Gagnoa 4d		<b>Profil :</b> B3		<b>Roche :</b> ?		<b>Utilisation du sol :</b> Jachère			
<b>Pente :</b>		<b>Position topographique :</b> moyen versant			<b>Végétation :</b> savane arbustive			<b>Micro relief :</b> pente		<b>Type de sol :</b> Sol brunifié, rajeuni à faciès remanié			
(Cambisol manganiférique)													
Profondeur		0 - 10		10 - 22		22 - 35		35 - 55		55 - 70		70 - 120	
Couleur	Humidité	Brun sombre 2,5YR 6/2	Sec	Brun rouge 2,5YR 4/3	frais à sec	Brun rouge 2,5YR 4/4	frais	BRT 2,5YR 5/8 Tâches : J 10YR 8/1	frais	BRT 2,5YR 4/8 Tâches : J 7,5YR 8/3	frais	Bigarré 2,5YR 5/8 Tâches : J 10YR 8/4	frais
			Humifère		Humifère		Apparement non humifère		Apparement non humifère		Apparement non humifère		Apparement non humifère
Texture	% argile	ALS	20 à 25 %	ALS	25 à 30 %	ALS	35 à 40 %	ALS	65 - 70 %	A	75 - 80 %	A	85 - 90 %
% éléments grossiers	% quartz	68,14		73,54		72,25		71,33		67,85		66,33	
	% concrétions et nodules		> 30 %		> 30 %		> 30 %		> 30 %				
	% autres éléments												
Structure générale	Taille	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm
Structure du débit	Taille	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm
Cohésion générale	Cohésion agrégat	Cohérent à meuble	Cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent à friable	peu cohérent à friable	peu cohérent à friable	peu cohérent à friable
Porosité générale	Taille	poreux	mm	poreux	mm	poreux	mm	poreux	mm	poreux	mm	poreux	mm
Abondance des racines	Taille	très nombreuses racines	mm	assez nombreuses racines	mm	assez nombreuses racines	mm	quelques racines	mm	rare racines	mm	rare racines	mm
Orientation des racines	Classe de drainage	Subhorizontale	1,7	Subhorizontale	1,7	Subhorizontale	1,6	Subhorizontale	3,5	Subhorizontale	6,5	Subhorizontale	8,5
Transition	Limite	nette	± régulière	progressive	± régulière	progressive	± régulière	diffuse	± régulière	progressive	± régulière		
Contraintes	Contrainte									texture		texture, mauvais drainage	
Type d'horizon		A <sub>11</sub>		A <sub>12</sub>		B <sub>1</sub>		B <sub>2</sub> (C)		B <sub>22</sub> (C)		C	

<b>ANNEXE 4</b>		<b>Fiche de description du profil B4</b>									
<b>Date :</b> 29/08/2010		<b>Lieu :</b> Blafo		<b>Feuille :</b> Gagnoa 4d		<b>Profil :</b> B4		<b>Roche :</b> ?		<b>Utilisation du sol :</b> Jachère	
<b>Pente :</b> bas		<b>Position topographique :</b> bas versant			<b>Végétation :</b> savane arbustive			<b>Micro relief :</b> plateau		<b>Type de sol :</b> Sol brunifié, remanié, induré à faciès rajeuni	
(Cambisol plinthique)											
Profondeur		0 - 5		5 - 15		15 - 30		30 - 50		50 - 70	
Couleur	Humidité	Sombre 7,5YR 4/1	Sec	Brun sombre 2,5YR 3/2	Sec	BO 5YR 4/6 Tâches : BE 7,5YR 7/6, J 2,5Y 7/8	frais à sec	BR 2,5YR 4/6 Tâches : JB 7,5YR 6/6, J 10YR 8/8	frais à sec	Bariolée 5YR 4/6 Tâches : J 10YR 7/8, NO 10YR 2/1	frais
	Matière organique		Humifère		Humifère		Apparement non humifère		Apparement non humifère		Apparement non humifère
Texture	% argile	ALS à sable fin	20%	ASL à sable moyen et grossier	25 à 30 %	AS à sable fin et moyen	60%	AS à sable moyen et grossier	60 à 65 %	AS à sable moyen et grossier	40
% éléments grossiers	% quartz	72,73	< 1%	91,67	> 30 %	84,62	> 30 %	81,82	> 30 %	79,33	> 2 %
	% concrétions et nodules										
	% autres éléments										
Structure générale	Taille	Grumeleuse	mm à cm	polyédrique à nuciforme	mm à cm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	mm à cm
Structure du débit	Taille	Grumeleuse	mm à cm	polyédrique à nuciforme	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse	mm à cm
Cohésion générale	Cohésion agrégat	Cohérent	Cohérent	peu cohérent	peu cohérent	Cohérent	Cohérent	Cohérent	Cohérent	Cohérent	Cohérent
Porosité générale	Taille	poreux	mm	poreux	mm	poreux	mm	poreux	mm	très poreux	mm
Abondance des racines	Taille	nombreuses racines	mm à cm	nombreuses racines	mm à cm	assez nombreuses racines	mm à cm	quelques racines	mm	rare	mm
Orientation des racines	Classe de drainage	Subhorizontale	1,6	Subhorizontale	1,6	Subhorizontale	2,2	Subverticale	2,5	Subverticale	5,5
Transition	Limite	progressive	irrégulière	nette	± régulière	diffuse	± régulière	diffuse	± régulière		
Contraintes	Contrainte	faible épaisseur				éléments grossiers		mauvais drainage			
Type d'horizon		A <sub>11</sub>		A <sub>12</sub>		B <sub>1</sub> (C)		B <sub>2</sub> (C)		B <sub>22</sub> (C)	

<b>ANNEXE 5</b>		<b>Fiche de description du profil G1</b>									
<b>Date :</b> 28/08/2010		<b>Lieu :</b> Guéto		<b>Feuille :</b> Gagnoa 4d		<b>Profil :</b> G1		<b>Roche :</b> ?		<b>Utilisation du sol :</b> activité minière	
<b>Pente :</b> 0		<b>Position topographique :</b> sommet			<b>Végétation :</b> savane herbeuse			<b>Micro relief :</b> plateau		<b>Type de sol :</b> Sol brunifié, remanié à faciès rajeuni	
(Cambisol pisoplinthique)											
Profondeur		0 - 10		10 - 25		25 - 40		40 - 65		<b>65 - 120</b>	
Couleur	Humidité	Brun 7,5YR 3/2	frais à sec	Brun sombre 7,5YR 4/2	frais à sec	BST 7,5YR 4/3 Tâches : OJ 7,5YR 6/8, OR 10R 4/6	frais	BRT 2,5YR 4/4 Tâches : OO 10R 6/8, OJ 2,5YR 6/6	frais	BRT 2,5YR 4/4 Tâches : OR 2,5YR 6/3, OJ 2,5YR 6/6	frais
	Matière organique		Humifère		Humifère		humifère		apparemment non humifère		apparemment non humifère
Texture	% argile	LSA à sable fin et moyen	10 à 15 %	SA à sable moyen et grossier	15 à 20 %	AS à sable moyen et grossier	20 à 35 %	AS à sable grossier	30 à 45 %	AS à sable grossier	45 à 55 %
% éléments grossiers	% quartz	75		84,62		85,57		83,33		83,33	
	% concrétions et nodules										
	% autres éléments										
Structure générale	Taille	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse au niveau des racines	mm à cm	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse au niveau des racines	mm à cm	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse au niveau des racines	cm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	cm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	cm
Structure du débit	Taille	polyédrique subanguleuse à tendance	mm à cm	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse	mm à cm	polyédrique subanguleuse à tendance	cm	polyédrique induite par les éléments grossiers	cm	polyédrique induite par les éléments	cm
Cohésion générale	Cohésion agrégat	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent induit par les éléments grossiers	cohérent	cohérent	cohérent	cohérent
Porosité générale	Taille	très poreux	mm	très poreux	mm	peu poreux	cm	poreux	mm	peu poreux	mm
Abondance des racines	Taille	nombreuses racines	mm	nombreuses racines	mm à cm	nombreuses racines	mm	rare	mm	rare	mm
Orientation des racines	Classe de drainage	Subhorizontale	1,6	Subhorizontale	1,6	Subhorizontale	1,8	Subhorizontale	2,5	Subhorizontale	2,5
Transition	Limite	progressive	± régulière	diffuse	± régulière	nette	± régulière	progressive	± régulière		
Contraintes	Contrainte	charge en éléments grossiers		charge en éléments grossiers		charge en éléments grossiers		charge en éléments grossiers		charge en éléments grossiers	
Type d'horizon		A <sub>11</sub>		A <sub>12</sub>		AB		B <sub>1</sub> (C)		B <sub>2</sub> (C)	

<b>ANNEXE 6</b>		<b>Fiche de description du profil G2</b>									
<b>Date :</b> 28/08/2010		<b>Lieu :</b> Guéto		<b>Feuille :</b> Gagnoa 4d		<b>Profil :</b> G2		<b>Roche :</b> ?		<b>Utilisation du sol :</b> Activités minères	
<b>Pente :</b>		<b>Position topographique :</b> Haut versant			<b>Végétation :</b> savane herbeuse			<b>Micro relief :</b> versant		<b>Type de sol :</b> Sol brunifié, rajeuni, remanié	
(Cambisol manganiférique)											
Profondeur		0 - 10		10 - 25		25 - 43		43 - 70		<b>70 - 100</b>	
Couleur	Humidité	Brun 2,5YR 3/2	frais	BST 2,5YR 3/2 Tâches : OJ 2,5YR 7/8, BE 7,5YR 8/6	frais	BST 2,5YR 4/3 Tâches : OJ 2,5YR 7/8, OV 10R 5/8	frais	BRT 10R 4/6 Tâches : GL BE 2,5Y 8/1	frais	BRT 2,5YR 4/6 Tâches : GL 8/N, BE 2,5Y 8/1	frais
	Matière organique		Humifère		Humifère		Légèrement humifère		apparemment non humifère		apparemment non humifère
Texture	% argile	LSA à sable fin et moyen	15 à 20 %	SA à sable moyen et grossier	20 à 25 %	AS à sable moyen et grossier	25 à 35 %	AS à sable moyen et grossier	35 à 45%	AS à sable fin et moyen	45 à 55%
% éléments grossiers	% quartz	70		81,82		81,82		66,66		66,67	
	% concrétions et nodules										
	% autres éléments										
Structure générale	Taille	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse au niveau des racines	cm	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse au niveau des racines	cm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	cm	polyédrique subanguleuse	cm	polyédrique subanguleuse	cm
Structure du débit	Taille	polyédrique subanguleuse à tendance	cm	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse	cm	polyédrique subanguleuse à tendance	cm	polyédrique subanguleuse induite par les	cm	polyédrique subanguleuse induite par les	cm
Cohésion générale	Cohésion agrégat	peu cohérent	Cohérent	peu cohérent	peu cohérent	peu cohérent induit par les éléments grossiers	peu cohérent	cohérent	cohérent	cohérent	cohérent
Porosité générale	Taille	très poreux	mm à cm	très poreux	mm à cm	très poreux	mm	poreux	mm	poreux	mm
Abondance des racines	Taille	très nombreuses racines	mm	très nombreuses racines	mm	nombreuses racines	mm	rares	mm	rares	mm
Orientation des racines	Classe de drainage	Subhorizontale	1,6	Subhorizontale	1,8	Subhorizontale	1,8	Subhorizontale	2,5	Subhorizontale	5,5
Transition	Limite	progressive	± régulière	progressive	± régulière	nette	± régulière	diffuse	± régulière		
Contraintes	Contrainte	charge en éléments grossiers		charge en éléments grossiers		charge en éléments grossiers					
Type d'horizon		A <sub>1</sub>		A <sub>3</sub>		B <sub>1</sub>		B <sub>21</sub> (g)		B <sub>22</sub> (g)(C)	

<b>ANNEXE 7</b>		<b>Fiche de description du profil G3</b>											
<b>Date :</b> 28/08/2010		<b>Lieu :</b> Guéto		<b>Feuille :</b> Gagnoa 4d		<b>Profil :</b> G3		<b>Roche :</b> ?		<b>Utilisation du sol :</b> Activité minière			
<b>Pente :</b> 1/3 supérieur		<b>Position topographique :</b> moyen versant		<b>Végétation :</b> savane arbustive		<b>Micro relief :</b> versant		<b>Type de sol :</b> Sol brunifié, rajeuni, remanié					
(Cambisol manganiférique)													
Profondeur		0 - 20		20 - 60		60 - 100		100 - 200					
Couleur	Humidité	Brun sombre 2,5YR 4/3		frais	Brun sombre 2,5YR 4/4		frais	BRT 2,5YR 5/6 Tâches : VI 2,5YR 7/2, OR 10R 5/8		frais	BRT 2,5YR 5/4 Tâches : VI 2,5YR 7/2, GL, OR 10R 5/4		Sec
	Matière organique			apparemment humifère			apparemment humifère			apparemment non humifère			apparemment non humifère
Texture	% argile	LSA à sable fin et moyen		10 à 15 %	AS à sable moyen		15 à 30 %	AS à sable moyen		30 à 45 %	AS à sable moyen		45 à 55%
% éléments grossiers	% quartz	66,67			76,92			63,64			72,73		
	% concrétions et nodules												
	% autres éléments												
Structure générale	Taille	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse		cm	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse		cm	polyédrique subanguleuse		cm	polyédrique subanguleuse		cm
Structure du débit	Taille	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse		cm	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse		cm	polyédrique subanguleuse		cm	polyédrique subanguleuse		cm
Cohésion générale	Cohésion agrégat	Cohérent		Cohérent	peu cohérent		peu cohérent	très cohérent		très cohérent	très cohérent		très cohérent
Porosité générale	Taille	très poreux		mm à cm	très poreux		mm à cm	poreux		mm	poreux		mm
Abondance des racines	Taille	nombreuses racines		mm à cm	nombreuses racines		mm à cm	rares racines		mm	rares racines		mm
Orientation des racines	Classe de drainage	Subhorizontale		1,6	Subhorizontale		1,6	Subhorizontale		1,8	Subhorizontale		4,5
Transition	Limite	progressive		± régulière	progressive		± régulière	progressive		± régulière			
Contraintes	Contrainte												
Type d'horizon		A <sub>1</sub>			A <sub>3</sub>			B <sub>1</sub>			B <sub>2</sub> FeC		

**ANNEXE 8**
**Fiche de description du profil G4**

<b>Date :</b> 28/08/2010		<b>Lieu :</b> Guéto		<b>Feuille :</b> Gagnoa 4d		<b>Profil :</b> G4		<b>Roche :</b> ?		<b>Utilisation du sol :</b> Activité minière	
<b>Pente :</b> 1/3 inférieur		<b>Position topographique :</b> moyen versant		<b>Végétation :</b> savane arbustive		<b>Micro relief :</b> versant		<b>Type de sol :</b> Sol brunifié remanié à faciès rajeuni et induré remanié			
										(Cambisol plinthique)	
Profondeur		0 - 15		15 - 47		47 - 100		100 - 140			
Couleur	Humidité	Brun sombre 7,5YR 4/3	frais à sec	Brun rougeâtre 2,5YR 4/4	frais	BRT 10R 4/6 Tâches : OJ 2,5YR 7/8, NO 7,5YR 3/1	frais	induré			
	Matière organique		Humifère		apparemment humifère		apparemment humifère				
Texture	% argile	LSA à sable fin et moyen	10 à 15 %	SA à sable moyen et grossier	15 à 25 %	AS à sable grossier	25 à 35 %				
% éléments grossiers	% quartz	63,63		80		76,92		78,57			
	% concrétions et nodules										
	% autres éléments										
Structure générale	Taille	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse	cm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	cm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	cm	induré			
Structure du débit	Taille	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse	cm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	cm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	cm	induré			
Cohésion générale	Cohésion agrégat	Cohérent	Cohérent	cohérent	cohérent	cohérent	cohérent	induré			
Porosité générale	Taille	poreux	mm à cm	poreux	mm à cm	peu poreux	mm				
Abondance des racines	Taille	très nombreuses racines	mm à cm	nombreuses racines	mm	rare racines	mm				
Orientation des racines	Classe de drainage	Subhorizontale	1,6	Subhorizontale	1,8	Subhorizontale	4,5				
Transition	Limite	diffuse	± régulière	progressive	± régulière	progressive	± régulière				
Contraintes	Contrainte			charge en éléments grossiers		charge en éléments grossiers					
Type d'horizon		A <sub>1</sub>		A <sub>3</sub>		B <sub>1</sub>		B <sub>2</sub> FeC			

<b>ANNEXE 9</b>		<b>Fiche de description du profil G5</b>				
<b>Date :</b> 28/08/2010		<b>Lieu :</b> Guéto	<b>Feuille :</b> Gagnoa 4d	<b>Profil :</b> G5	<b>Roche :</b> ?	<b>Utilisation du sol :</b> Activité minière
<b>Pente :</b> bas		<b>Position topographique :</b> bas versant	<b>Végétation :</b> savane arbustive	<b>Micro relief :</b> versant	<b>Type de sol :</b> Sol brunifié, remanié à faciès rajeuni et induré (Cambisol plinthique)	
Profondeur		0 - 15		15 - 200		
Couleur	Humidité	Brun sombre 7,5YR 3/3	frais à sec	Brun rouge tacheté 2,5YR 4/4 Tâches : OJ 7,5YR 6/8, OV 10R 4/8, NO 7,5YR 3/1	frais	
	Matière organique		apparemment humifère		apparemment non humifère	
Texture	% argile	SA à sable fin et moyen	5 à 10 %	AS à sable moyen et grossier	10 à 25 %	
% éléments grossiers	% quartz	69,23		84,62		
	% concrétions et nodules					
	% autres éléments					
Structure générale	Taille	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse au niveau des racines	cm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	cm	
Structure du débit	Taille	polyédrique subanguleuse à tendance grumeleuse au niveau des racines	cm	polyédrique subanguleuse induite par les éléments grossiers	cm	
Cohésion générale	Cohésion agrégat	peu cohérent	cohérent	très cohérent	très cohérent	
Porosité générale	Taille	peu poreux	mm à cm	peu poreux	mm	
Abondance des racines	Taille	nombreuses racines	mm	très rares racines	mm	
Orientation des racines	Classe de drainage	Subhorizontale	1,6	Subhorizontale	6,5	
Transition	Limite	nette	± régulière			
Contraintes	Contrainte	charge en éléments grossiers		charge en éléments grossiers		
Type d'horizon		A <sub>11</sub>		AB(C)		

ANNEXE 10		Résultats (en %) de la microanalyse sur échantillons de sols (horizons) du Blafo , répétée 3 fois													
Profils	Horizons	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	CuO	SrO	MoO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
B1	A <sub>11</sub>		0,8	31,57	49,57	1,15	0,79	2,11	0,28	13,73					
			0,65	30,18	49,71	1,12	0,67	1,81	0,47	15,39					
			0,96	30,5	51,26	1,12	1,22	1,35	0	13,6					
	A <sub>12</sub>		0,35	0,67	32,33	47,04	0,95	0,45	1,48	0	15,86			0,88	
			0,64	0,68	32,51	46,6	0,9	0,36	1,82	0,27	15,22			0,99	
			0,33	0,59	31,61	47,67	0,87	0,55	1,74	0,31	16,31			0	
	B <sub>1</sub> (C)g		0,3	0,5	35,15	45,06	0,77		1,75	0	16,05				0,42
			0,52	0,57	35,12	44,82	0,84		1,64	0,3	15,33				0,86
			0,25	0,35	35,25	44,52	0,78		1,44	0	16,79				0,61
	B <sub>2</sub> (C)		0,5	0,49	35,34	43,23	0,85		1,65		16,07		1,15		0,72
			0,4	0,45	34,52	43,29	0,86		1,95		16,21		1,43		0,89
			0,41	0,52	33,64	41,99	0,7		1,67		18,06		1,91		1,1
B2	A <sub>1</sub>		0,53		25,67	48,99	1,07	0,66	1,69	1,36	19,03		1		
			0,39		24,27	49,63	1,07	0,64	1,75	1,16	20,13		0,95		
			0,49		23,92	50,43	1,1	0,76	1,63	0,76	19,55		1,36		
	AB(C)				26,89	49,13	1,11	0,43	1,66	0,75	18,9		1,13		
					28,01	47,38	1,11	0,61	1,71	0,86	19,24		1,08		
					27,68	47,75	1,07	0,47	1,76	1,03	20,24		0		
	B <sub>1</sub> (C)		0,47		29,75	47,38	1,01		1,66	0,55	17,86		1,33		
			0,61		32,32	45,65	1,01		1,5	0,44	18,46		0		
			0,48		31,92	44,9	1,05		1,67	0,67	18,37		0,94		
	B <sub>2</sub> (C)		0,38		32,43	41,78	1		1,58	0,58	20,87		1,38		
			0,42		33,19	43,29	0,98		1,49	0,57	19,24		0,83		
			0,33		32,98	41,53	1,08		1,52	0,49	21,4		0,67		
	C		0,57		32,72	40,85	1,13		2,05	0,51	20,97	0	1,21		
			0,48		32,34	41,72	0,97		1,76	0,49	20,72	0,52	1,01		
			0,47		32,56	41,18	0,97		1,61	0,46	21,54	0	1,2		
B3	A <sub>11</sub>		1,47		25,77	57,04	2,03	0,39	1,09	0,4	10,21	0,44	1,16		
			1,62		27,77	55,46	2,18	0,26	0,98	0,36	10,08	0,36	0,93		
			1,59		27,99	55,49	2,15	0,38	0,88	0,39	9,96	0,37	0,79		
	A <sub>12</sub>		1,54		28,73	54,26	2,26		0,88	0,39	11,93		0		
			1,47		29,42	52,48	2,33		1,07	0,79	11,56		0,87		
			1,65		28,98	52,5	2,31		1,05	0,42	12,05		1,03		
	B <sub>1</sub>		1,98		29,96	51,32	2,19		0,93	0,4	12,29	0	0,93		
			1,7		29,78	51,54	2,21		0,77	0,66	12,19	0,45	0,7		
			1,59		30,48	51,17	2,26		0,86	0,35	12,29	0	0,99		
	B <sub>2</sub> (C)		1,03		24,03	56,36	1,39		0,88	1,07	13,82	0,4	1,01		
			1,18		24,86	57,14	1,48		0,94	0,68	12,49	0,42	0,8		
			1,06		23,13	57,45	1,32		0,83	0,79	14,45	0	0,97		
	B <sub>22</sub> (C)		1,52		28,97	56,07	2,61		0,73		8,65	0	1,45		
			1,63		28,68	55,76	2,53		0,56		9,79	0	1,05		
			1,69		28,64	55,7	2,36		0,66		9,39	0,39	1,16		
C		1,71		24,33	64,33	2,72		0,58		5,03	0	1,29			
		1,77		24,29	64,52	2,64		0,67		4,88	0,33	0,91			
		1,66		23,51	65,43	2,66		0,47		5,07	0	1,2			
B4	A <sub>11</sub>		0,8	0,39	19,37	64,92	1,47	0,58	1,16	0,46	9,76		1,09		
			0,97	0,33	19,07	65,65	1,27	0,61	0,96	0,87	9,1		1,17		
			0,87	0,5	19,06	65,8	1,33	0,59	0,77	0,71	9,1		1,26		
	A <sub>12</sub>		0,94		21,86	60,83	1,5		2,42	0,45	10,61		1,39		
			0,92		21,52	64,26	1,4		1,08	0,56	9,42		0,84		
			0,95		22,03	63,22	1,54		1,02	0,52	9,43		1,29		
	B <sub>1</sub> (C)		0,9		24,29	59,91	1,5		0,95	0,35	10,23	0,45	1,43		
			1,01		25,13	60,73	1,49		0,88	0	10,76	0	0		
			1,06		24,87	58,01	1,49		1,02	0,37	11,31	0,42	1,47		
	B <sub>2</sub> (C)		1		24,75	56,2	1,48		1,04	2	12,41	0	1,13		
			0,9		25,68	57,65	1,53		1,08	0,42	11,65	0,36	0,74		
			1,05		24,88	57,15	1,5		1,08	0,48	12,39	0,45	1,02		
	B <sub>22</sub> (C)		0,94		24,07	56,58	1,39		0,95	0,9	13,72	0	1,44		
			1,03		24,2	57,16	1,49		0,96	1,09	12,61	0,44	1,01		
			0,85		23,6	58,33	1,47		0,9	1,21	12,86	0	0,78		

ANNEXE 11		Résultats (en %) de la microanalyse sur échantillons de sols (horizons) du Guéto , répétés 3 fois											
Profils	Horizons	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	CuO	SrO	MoO <sub>3</sub>
G1	A <sub>11</sub>	1,16		34,31	44,28	2,37	1,28	1,39		12,18	0,61	2,42	
		1,28		34,18	45,69	2,33	0,67	1,3		11,71	0,7	2,14	
		1,22		34,33	45,6	2,37	0,7	1,39		11,96	0	2,43	
	A <sub>12</sub>	1,08		34,8	44,17	2,26	0,58	1,41		13,7		2,01	
		0,94		35,79	45,58	2,34	0,53	1,27		12,41		1,15	
		1,22		34,79	44,71	2,45	0,56	1,27		13,06		1,92	
	AB	1,03		36,86	44,25	2,24		1,25		13,11	0	1,27	
		1,21		36,32	43,95	2,45		1,46		13,41	0,4	0,8	
		1,07		36,24	44,11	2,46		1,28		13,4	0	1,45	
	B <sub>1</sub> (C)	0,99		37,4	42,52	2,35		1,3		14,18		1,27	
		0,9		37,32	43,02	2,18		1,39		14,16		1,03	
		1,13		37,36	43,02	2,32		1,33		13,59		1,24	
B <sub>2</sub> (C)	1,05		37,92	43,7	2,33		1,26		12,74		1		
	1,15		37,54	42,47	2,35		1,15		14,48		0,86		
	1,06		37,67	43,81	2,58		1,16		12,18		1,54		
G2	A <sub>1</sub>	1,3		35,23	47,44	2,54	0,6	1,38		9,95		1,56	
		1,56		35,2	46,7	2,62	0,49	1,55		10,48		1,39	
		1,58		35,15	47,06	2,61	0,46	1,49		10,38		1,27	
	A <sub>3</sub>	1,52		36,12	45,35	2,51	0	1,09		12,29		1,11	
		1,53		36,54	45,21	2,66	0,29	1,25		11,36		1,16	
		1,54		36,23	44,87	2,47	0,25	1,27		12,21		1,16	
	B <sub>1</sub>	1,39		37,26	44,66	2,5		1,25		11,72		1,22	
		1,29		36,67	44,64	2,49		1,18		12,27		1,46	
		1,34		37,06	45,77	2,18		1,27		10,89		1,48	
	B <sub>21</sub> (g)	1,46		38,33	46,09	2,69		1,44		8,62		1,37	
		1,41		38,18	46,57	2,78		1,41		8,49		1,17	
		1,71		38,11	45,94	2,76		1,38		8,72		1,37	
B <sub>22</sub> (g)(C)	2,04		38,17	46,05	2,96		1,29		8,18		1,31		
	1,96		38,48	45,77	3,17		1,44		9,18		0		
	1,89		37,99	45,35	3,12		1,41		8,87		1,36		
G3	A <sub>1</sub>	1,35		35,14	45,04	4,48	0,23	1,23	0,46	10,1	0,52	1,45	
		1,47		35,05	45,7	4,34	0,23	1,34	0,45	9,92	0,53	0,95	
		1,24		33,64	41,82	4,32	0,2	1,73	0,77	15,18	0	1,12	
	AB	1,17		35,85	45,29	4		1,36	0,24	11,01		1,08	
		1,2		35,59	45,57	3,55		1,13	0	11,86		1,09	
		1,09		35,43	45,97	3,81		1,21	0,47	10,9		1,13	
	B <sub>1</sub>	1,22		36,95	47	4,91		1,37		7,57		0,97	
		1,3		36,64	46,16	5,04		1,5		8,16		1,2	
		1,22		37,04	45,17	4,84		1,71		8,57		1,45	
	B <sub>2</sub> (g)(C)	1,49		35,01	47,01	5,53		1,42		8,28		1,25	
		1,41		35,22	45,71	5,81		1,15		9,65		1,04	
		1,44		36	46,5	6,05		1,43		7,3		1,29	
G4	A <sub>1</sub>	0,73		19,45	66,08	1,63	0,2	1,19	0,44	7,73	0,46	2,1	
		0,64		21,84	63,11	2,11	0,31	1,18	0,57	8,04	0,39	1,82	
		0,83		22,79	62,22	1,81	0,18	1,16	0,54	8,75	0,52	1,19	
	A <sub>3</sub>	0,75		26,58	56,22	1,76		1,3	0,47	11,46		1,46	
		0,71		27,28	54,66	1,93		1,34	0,59	11,95		1,53	
		0,87		27,28	55,6	1,76		1,1	0,52	11,78		1,09	
	B <sub>1</sub>	0,88		29,24	53,29	1,83		1,01	0,33	12,23		1,19	
		0,76		29,94	53,33	1,74		1,07	0	11,67		1,5	
		0,91		29,07	53,76	1,84		0,99	0,43	11,85		1,15	
	B <sub>2</sub> FeC	0,94		22,76	47,21	2,03	0	1,04	4,94	20,12	0	0,95	
		1,08		23,27	48,84	2,15	0	0,79	3,65	19,16	0,38	0,68	
		1,16		24,64	47,18	2,31	0,21	0,8	3,75	19,17	0	0,77	
G5	A <sub>1</sub>	0,55	0,55	22,07	55,13	1,62	0,35	1,35	1,3	16,55			0,53
		0,42	0,48	22,3	54,11	1,61	0,29	1,33	1,26	17,49			0,7
		0,49	0,52	21,6	56,65	1,53	0,27	1,28	1,1	15,7			0,86
	AB(C)	0,54		23,48	53,38	1,25		1,01	1,38	17,59		1,38	
		0,64		25,85	45,89	1,35		1,21	1,61	22,75		0,7	
		0,62		26,23	47,43	1,39		1,21	1,17	21,01		0,93	

ANNEXE 12																					
Résultats (en ppm) du dosage des ETM sur échantillons de sols (horizons) du Blafo, répétés 3 fois																					
	B1				B2					B3					B4						
ETM	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	B <sub>1</sub> (C)g	B <sub>2</sub> (C)	A <sub>1</sub>	AB(C)	B <sub>1</sub> (C)	B <sub>2</sub> (C)	C	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub> (C)	B <sub>22</sub> (C)	C	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	B <sub>1</sub> (C)	B <sub>2</sub> (C)	B <sub>22</sub> (C)	
Cr1	19,33	14,83	13,67	11,33	16,33	15,33	35,00	18,50	27,83	11,33	16,33	39,50	30,00	27,50	10,00	20,83	21,67	17,50	16,67	22,67	
Cr2	27,13	21,08	18,92	15,31	21,95	20,47	47,32	25,90	38,16	15,87	22,82	50,31	42,74	37,35	14,12	30,51	28,93	24,50	22,06	32,34	
Cr3	26,80	20,10	17,08	14,90	20,70	19,20	46,10	24,25	37,20	14,72	21,01	49,47	41,85	36,20	14,00	29,30	27,10	24,12	21,99	30,25	
Ni1	30,33	22,17	25,33	25,67	26,00	30,50	27,67	46,67	28,17	26,17	30,67	32,83	24,83	23,33	12,17	21,67	13,00	29,67	19,50	16,17	
Ni2	32,17	20,51	23,16	27,05	24,72	28,17	28,14	50,20	26,81	24,17	28,57	31,25	26,12	20,64	13,27	20,50	15,21	27,17	21,05	16,28	
Ni3	30,20	20,00	21,10	25,05	23,20	26,95	27,12	50,00	25,98	23,10	27,58	30,10	25,72	19,95	13,10	20,04	14,98	26,45	21,00	15,78	
Pb1	28,67	23,17	16,67	13,00	49,83	35,67	35,17	39,00	20,50	27,17	23,00	35,00	11,33	26,33	20,83	31,33	24,33	30,00	30,17	13,83	
Pb2	30,12	21,83	17,05	10,87	52,64	33,26	36,24	37,25	17,96	30,14	26,13	32,51	13,25	23,17	22,08	29,15	25,42	28,72	31,45	15,03	
Pb3	29,10	20,20	16,98	10,12	52,30	32,12	36,00	36,56	17,24	30,01	26,03	31,14	13,00	22,97	21,45	28,89	25,01	28,15	31,00	14,97	
Zn1	65,33	67,67	64,00	43,33	76,33	64,67	78,33	79,67	45,33	88,00	92,67	65,33	77,33	50,00	30,67	43,33	16,67	64,00	55,33	37,33	
Zn2	81,67	83,25	80,17	50,93	95,37	81,82	97,75	99,28	54,06	108,92	112,84	81,67	96,24	60,52	39,61	53,17	21,83	80,12	70,36	44,95	
Zn3	81,23	82,20	80,00	50,21	94,89	81,50	97,00	98,98	53,79	108,10	112,30	80,69	96,00	60,10	39,10	52,77	20,89	79,20	69,12	44,00	
Cu1	28,67	42,83	26,33	32,67	57,67	36,50	38,17	57,83	36,83	52,50	65,33	30,33	27,33	36,00	33,17	24,83	26,50	62,00	44,17	44,00	
Cu2	107,84	158,04	99,07	124,03	216,94	135,62	141,58	217,57	138,56	194,32	235,72	112,94	102,81	130,41	123,32	90,15	100,13	213,74	160,08	163,24	
Cu3	106,20	156,00	98,98	123,10	215,00	135,10	140,20	216,78	137,20	193,20	234,10	111,20	101,20	128,96	122,30	89,12	100,00	212,29	159,98	162,39	
Cd1	1,53	1,11	0,27	0,56	2,23	0,29	1,33	0,79	0,60	0,70	0,20	1,22	0,43	1,63	1,23	1,05	0,07	0,95	0,03	1,01	
Cd2	1,29	0,97	0,16	0,61	1,86	0,21	1,05	0,57	0,71	0,57	0,20	1,13	0,34	1,76	1,20	1,51	0,09	1,05	0,06	1,08	
Cd3	1,20	0,95	0,17	0,69	1,90	0,23	1,03	0,54	0,73	0,60	0,19	1,15	0,33	1,74	1,21	1,50	0,10	1,02	0,08	1,10	
Fe1	51238,61	46183,06	53127,50	35905,28	43405,28	53683,06	45071,94	46183,06	37571,94	43127,50	47016,39	54238,61	64238,61	41460,83	35349,72	35905,28	43683,06	53127,50	45905,28	30905,28	
Fe2	48132,30	40936,00	50751,51	37182,13	40965,92	49783,13	47391,06	41849,35	32175,42	41904,14	43106,15	51932,20	56324,06	42161,53	37350,13	31056,94	37365,82	45128,05	40524,17	31509,24	
Fe3	49000,00	41000,00	51500,00	38100,00	41965,92	50200,00	48321,00	42989,00	33200,00	42054,00	44125,00	52854,00	57351,00	43158,00	38326,00	32152,00	38401,00	46213,00	41258,00	32602,00	
Mn1	11166,76	10565,23	10885,52	7184,00	13047,27	11042,75	13488,65	13255,15	8489,93	15041,61	14545,15	11169,29	12411,32	9637,92	7512,76	8183,52	9687,68	9581,34	10121,89	7922,15	
Mn2	11183,09	10582,15	10901,52	7194,83	13066,35	11058,92	13508,23	13275,07	8501,26	15063,61	14568,32	11185,62	12430,65	9650,42	7520,43	8194,35	9701,85	9597,34	10135,72	7931,48	
Mn3	11150,09	10482,25	10850,52	7150,83	13060,35	11050,92	13498,23	13255,07	8499,26	15050,61	14468,32	11175,62	12428,00	9646,20	7514,21	8190,21	9698,00	9489,20	10112,00	7925,30	
Sr1	95,78	80,34	68,76	67,82	94,16	86,86	77,09	66,93	67,22	105,76	99,53	115,62	108,52	101,04	108,86	95,70	95,86	89,87	100,31	97,26	
Sr2	91,78	81,34	62,76	63,82	95,16	88,86	75,09	64,93	69,22	102,76	100,53	115,00	106,55	101,00	110,80	97,70	97,00	90,01	101,31	97,56	
Sr3	99,42	88,28	69,49	70,42	103,16	96,82	82,50	71,77	76,33	110,63	108,18	123,43	114,52	108,45	118,45	104,48	104,08	96,85	108,66	105,17	
Ti1	3446,03	1955,30	3911,81	3711,51	1756,04	3328,64	3474,83	2257,47	3446,24	2742,90	2222,67	2511,89	2132,18	1833,30	1973,83	3765,22	3565,80	2255,99	2222,94	2608,76	
Ti2	3440,03	1950,30	3913,45	3709,22	1750,74	3323,02	3472,13	2255,98	3440,14	2743,39	2226,75	2513,27	2130,82	1836,34	1970,15	3764,22	3567,42	2256,00	2220,39	2610,87	
Ti3	3252,42	1816,83	3717,73	3509,07	1625,01	3138,06	3282,89	2115,78	3251,47	2561,60	2056,14	2338,60	1974,04	1698,20	1824,33	3540,15	3348,02	2095,39	2055,56	2421,99	
Mo1	14,44	12,92	18,20	14,84	10,62	15,68	10,58	13,92	14,63	10,23		14,90		13,68	13,27	11,82	18,10	16,43		15,63	
Mo2	12,44	10,92	15,20	13,24	9,00	15,98	12,23	14,25	16,00	10,20	7,00	13,90	10,00	13,01	12,25	13,00	17,21	14,20	6,80	15,23	
Mo3	11,50	10,10	14,89	13,10		15,20	12,10	13,98	14,78	10,23		13,79	10,12	12,95	12,10	13,01	17,01	13,98		15,10	
As1	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	
As2	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	
As3	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	
Hg1	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	
Hg2	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	
Hg3	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	

ANNEXE 13																					
Résultats (en ppm) du dosage des ETM sur échantillons de sols (horizons) du Blafo, répétés 3 fois																					
G1					G2						G3				G4				G5		
ETM	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	AB	B <sub>1</sub> (C)	B <sub>2</sub> (C)	A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>21</sub> (g)	B <sub>22</sub> (g)(C)	A <sub>1</sub>	AB	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub> (g)(C)	A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub> FeC	A <sub>1</sub>	AB(C)	
Cr1	13,67	21,83	11,67	10,33	14,67	12,50	12,33	14,00	13,33	16,17	47,50	30,50	14,00	11,83	24,17	31,83	16,33	11,67	33,17	40,33	
Cr2	19,23	29,17	17,32	14,48	20,62	16,52	17,82	20,61	20,04	22,67	62,74	42,61	18,35	17,20	33,82	43,71	22,84	15,38	43,28	56,37	
Cr3	17,12	28,96	16,33	14,10	19,96	15,65	16,96	19,54	20,00	21,26	60,98	40,96	17,77	16,56	32,50	41,20	21,06	14,26	42,01	53,23	
Ni1	27,50	14,50	12,17	13,83	11,67	19,17	28,17	19,17	29,00	14,67	25,17	35,83	17,17	19,50	21,33	28,17	16,50	33,50	30,67	18,17	
Ni2	25,83	15,31	14,92	15,06	13,24	17,83	26,95	18,30	27,92	15,31	23,70	36,35	18,51	17,82	22,45	26,71	16,21	30,91	32,17	20,13	
Ni3	25,00	14,98	13,78	15,02	12,95	17,10	25,48	17,96	26,66	15,01	22,70	35,96	18,00	17,36	21,97	26,03	16,21	30,24	31,10	20,00	
Pb1	15,00	18,83	24,00	20,00	37,00	22,17	19,50	26,33	18,00	44,83	24,67	20,00	20,50	15,67	10,83	25,67	51,50	12,33	49,00	41,17	
Pb2	14,21	20,51	22,14	23,47	34,92	24,54	21,05	23,83	20,19	40,92	26,31	20,95	18,72	17,82	14,36	23,09	47,95	14,16	43,03	43,73	
Pb3	14,10	19,78	21,58	22,15	33,95	24,12	21,00	23,12	19,67	40,10	25,75	19,32	17,22	16,89	14,12	22,68	46,08	13,29	41,12	42,58	
Zn1	45,67	42,67	23,00	31,00	34,00	39,00	25,67	41,67	26,67	24,67	84,67	91,00	44,33	65,33	31,00	42,33	29,67	67,67	46,00	36,33	
Zn2	57,38	50,41	29,12	38,73	42,17	49,23	33,08	52,15	32,36	30,89	100,92	115,04	55,14	78,67	38,35	50,92	37,26	82,09	57,46	46,27	
Zn3	56,98	49,20	28,70	37,20	41,89	47,25	31,25	50,15	31,25	30,20	100,01	114,25	54,23	78,00	37,10	50,02	36,54	81,00	55,24	45,23	
Cu1	68,83	50,83	35,00	52,17	47,17	40,83	28,67	32,83	38,17	42,50	13,67	80,33	65,50	97,83	34,17	44,00	38,00	62,33	41,50	30,50	
Cu2	259,12	184,02	135,69	194,17	177,27	150,59	108,29	123,52	135,56	153,74	61,93	287,19	251,06	347,28	130,51	160,16	142,39	221,95	156,23	116,72	
Cu3	257,95	183,98	134,52	193,68	176,58	149,65	107,23	122,05	133,26	152,01	60,98	286,52	250,00	345,26	130,00	158,23	142,20	220,36	154,24	113,26	
Cd1	1,32	1,28	0,05	0,28	0,48	1,22	1,86	1,41	0,58	0,13	2,03	0,61	0,24	0,39	0,03	0,55	2,75	1,04	1,25	2,00	
Cd2	1,36	1,28	0,07	0,24	0,52	1,23	1,56	1,75	0,65	0,23	1,97	0,61	0,26	0,42	0,05	0,55	2,37	1,13	1,25	1,96	
Cd3	1,34	1,26	0,09	0,22	0,50	1,24	1,58	1,74	0,68	0,25	1,96	0,64	0,28	0,40	0,08	0,56	2,40	1,11	1,24	1,97	
Fe1	37849,72	35349,72	38960,83	45627,50	38127,50	32294,17	41183,06	34516,39	52016,39	40349,72	40349,72	35627,50	36738,61	54238,61	25627,50	35071,94	24516,39	56183,06	38127,50	30071,94	
Fe2	32570,33	28914,92	40065,12	41568,05	36823,37	34902,51	38016,36	32615,50	45019,35	40917,03	42605,18	37915,62	33906,60	51472,93	28526,40	30527,48	26165,49	51382,04	37915,95	32073,16	
Fe3	33521,00	29500,00	41036,00	42898,00	37902,00	35857,00	39010,00	33745,00	46020,00	41859,00	43700,00	38895,00	34910,00	52410,00	29601,00	31654,00	27215,00	52398,00	38965,00	33120,00	
Mn1	8807,10	9393,01	4734,04	5299,71	6775,59	6408,08	4927,73	8403,54	5146,68	4226,17	14528,46	15558,04	8903,96	10169,29	6499,71	7237,24	5900,30	11141,18	8773,85	7611,10	
Mn2	8818,52	9403,68	4739,79	5307,46	6784,09	6417,83	4934,15	8413,96	5153,35	4232,34	14549,63	15580,79	8915,04	10185,62	6507,46	7247,82	5907,72	11158,10	8785,35	7620,18	
Mn3	8808,23	9399,25	4729,12	5301,21	6778,25	6410,89	4930,58	8409,24	5149,25	4230,24	14538,12	15579,25	8910,98	10180,89	6500,87	7245,68	5901,47	11155,20	8784,24	7617,12	
Sr1	125,55	125,78	113,22	109,15	105,30	152,10	144,64	133,29	148,86	190,97	155,56	145,48	163,63	189,23	102,08	99,21	89,16	116,13	83,63	79,36	
Sr2	123,98	122,78	111,22	108,00	106,00	151,90	146,94	138,29	151,86	188,99	152,56	146,48	161,24	186,06	103,10	99,99	88,98	116,95	81,78	80,24	
Sr3	132,22	130,99	119,41	115,63	113,66	160,82	155,66	146,64	160,65	198,55	162,33	155,46	170,60	193,43	114,20	107,40	95,94	126,35	89,01	87,82	
Ti1	4584,54	3476,32	1919,69	3239,40	3637,76	1768,03	3508,07	5010,73	2996,26	3803,67	3266,19	2744,37	5587,74	3215,53	1457,73	2241,06	2188,36	831,53	2745,52	2638,29	
Ti2	4587,31	3472,23	1920,87	3243,52	3639,34	1770,01	3512,36	5013,57	2999,09	3801,98	3268,30	2740,25	5586,87	3217,00	1458,35	2243,96	2189,87	829,56	2748,96	2642,60	
Ti3	4370,16	3280,12	1789,16	3057,20	3445,30	1642,66	3316,76	4753,34	2820,81	3600,63	3068,53	2554,99	5305,22	3100,66	1247,65	2088,78	2026,94	708,92	2578,09	2448,10	
Mo1	10,64	14,06	15,14	14,98	12,16	11,69	10,36	20,29	10,50	14,12	16,64	12,88	9,29	13,15	10,95	12,98		16,08	10,24	11,56	
Mo2	10,89	17,00	16,20	16,20	10,11	10,01	9,12	21,10	9,12	15,10	15,41	13,28	7,39	11,14	10,98	17,20	5,00	14,20	9,23	12,00	
Mo3	10,90	16,75	15,99	16,10	10,15	10,05	10,20	20,96	10,02	14,95	15,21	13,09	9,09	11,09	11,00	16,94		13,78	10,12	11,78	
As1	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	
As2	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	
As3	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	
Hg1	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	
Hg2	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	
Hg3	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	

ANNEXE 14																				
Résultats pH_Eh par horizons / par position topographique au Blafo (repeté 3 fois)																				
	B1				B2					B3					B4					
Paramètre	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	B <sub>1</sub> (Cg)	B <sub>2</sub> (C)	A <sub>1</sub>	AB(C)	B <sub>1</sub> (C)	B <sub>2</sub> (C)	C	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub> (C)	B <sub>22</sub> (C)	C	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	B <sub>1</sub> (C)	B <sub>2</sub> (C)	B <sub>22</sub> (C)
<b>pH1</b>	6,35	6,33	6,29	6,06	5,63	5,68	5,26	5,62	5,65	5,82	5,74	5,7	5,69	5,81	5,8	5,32	4,73	4,6	5,63	5,78
<b>pH2</b>	6,31	6,31	6,27	6,03	5,61	5,66	5,24	5,6	5,66	5,81	5,75	5,7	5,68	5,8	5,82	5,31	4,75	4,61	5,62	5,8
<b>pH3</b>	6,33	6,34	6,26	6,05	5,63	5,67	5,27	5,63	5,65	5,84	5,72	5,72	5,7	5,79	5,79	5,33	4,72	4,61	5,63	5,81
<b>Eh1</b>	36,4	26,8	28,1	40,1	64,8	65,1	87,7	66,9	64,8	55,3	58,4	62,8	61,8	55,8	55,7	86,4	119,7	126,1	66,1	57
<b>Eh2</b>	36,3	26,81	28,11	40,11	64,79	65,11	87,69	66,91	64,81	55,1	58,2	62,78	61,82	55,79	55,72	86,38	119,72	126,11	66,13	57,01
<b>Eh3</b>	36,3	26,8	28	40,12	64,81	65,1	87,71	66,89	64,82	55	58,2	62,8	61,81	55,77	55,7	86,37	119,69	126,12	66,12	57,03
Résultats pH_Eh par horizons / par position topographique au Guéto (repeté 3 fois)																				
	G1				G2					G3				G4				G5		
Paramètre	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	AB	B <sub>1</sub> (C)	B <sub>2</sub> (C)	A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub> (g)	B <sub>22</sub> (g)(C)	A <sub>1</sub>	AB	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub> (g)(C)	A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub> FeC	A <sub>1</sub>	AB(C)
<b>pH1</b>	5,41	5,28	4,88	4,34	4,83	5,15	5,44	5,64	5,8	5,8	4,82	5,07	5,34	5,67	4,96	4,86	4,9	4,86	5,48	5,5
<b>pH2</b>	5,4	5,28	4,89	4,33	4,82	5,16	5,42	5,63	5,79	5,8	4,8	5,08	5,33	5,66	4,94	4,85	4,9	4,86	5,47	5,51
<b>pH3</b>	5,42	5,3	4,9	4,35	4,84	5,13	5,45	5,65	5,81	5,81	4,83	5,06	5,34	5,68	4,95	4,86	4,9	4,86	5,48	5,51
<b>Eh1</b>	80,9	85,7	111,4	142,6	114,1	91,9	77	66,9	58,8	57,4	111,6	99,1	82,3	63,8	104,6	110,6	108,8	110,1	74,7	72,3
<b>Eh2</b>	80,91	85,72	111,43	142,61	114,11	91,91	77,02	66,91	58,82	57,42	111,61	99,1	82,31	63,82	104,63	110,61	108,8	110,12	74,71	72,32
<b>Eh3</b>	80,9	85,71	111,42	142,63	114,13	91,93	77,03	66,93	58,79	57,41	111,59	99,12	82,29	63,81	104,61	110,64	108,79	110,14	74,73	72,34

ANNEXE 15													
Résultats de la microanalyse sur échantillons de roche du Blafo et du Guéto (en %)													
				Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	FeO	CuO	SrO		
<b>Echantillon</b>	<b>R1</b>			2,01	19,79	70,46	3,25	0,92	1,33	0,45	1,79		
	<b>R2</b>			-	-	95,11	-	-	3,18	-	1,72		
	<b>R3</b>			0,96	9,97	82,91	1,63	0,53	2,2	-	1,8		
	<b>R4</b>			0,29	3,01	93,01	0,45	-	1,33	-	1,91		
Dosage des ETM étudiés dans les roches prélevés au Blafo et au Guéto (en ppm)													
Ech.	Cr	Ni	Pb	Zn	Cu	Cd	Fe	Mn	Sr	Ti	Mo	As	Hg
<b>R1</b>	54,45	37,42	30,97	24,48	28,18	2,17	19701	327,21	212,9	3296,18	21,34	3,15	< ld
<b>R2</b>	59,31	27,83	10,35	16,3	24,01	0,5	4667,67	203,46	4,3	< ld	16,63	4,3	< ld
<b>R3</b>	49,8	41,33	28,5	32,73	34,2	2,5	17767,67	145,19	104,33	914,91	11,26	4,65	< ld
<b>R4</b>	58,84	39,5	12,06	22,35	27,57	1,5	5601	198,68	27,37	341,42	18,2	2,83	< ld

# **PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES**

## PUBLICATIONS TIRÉES DE LA THÈSE

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

**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-Guétó (Toumodi) dans le centre-sud de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal* vol.9, N°9, pp. 18-30.

## PUBLICATIONS HORS THÈSE

**1- 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

**2- Nangah K. Y.,** Angui K. T. P., **Kouakou Y. K. N.,** Yao G. F., Alui K. A., N'Guessan K. A., Yao-Kouamé A. and Savané 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 (JBES)*, Vol. 3, No. 1, p. 23-32.

**3- Nangah K. Y.,** Angui K. T. P., **Kouakou Y. K. N.,** Rusu E., Yao-Kouame 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*, Vol. 2, N°4, pp. 372-383.

## **1<sup>ère</sup> PUBLICATION TIRÉE DE LA THÈSE**

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

## Diagnostic du fonds pédogéochimique des sols développés sur matériaux volcano-sédimentaires au Blafo-Guéto (Toumodi) dans le Centre-Sud de la Côte d'Ivoire

### [ Pedogeochemistry background Diagnosis of soil developed on volcanosedimentary materials at Blafo-Guéto (Toumodi) in South-central Côte d'Ivoire ]

*Yao Kouman Nestor KOUAKOU<sup>1</sup>, Guy Fernand YAO<sup>1</sup>, Krogba Yves NANGAH<sup>2</sup>,  
Thierry Philippe GUETY<sup>1</sup> et Albert YAO-KOUAME<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Laboratoire de Pédologie et de Géologie Appliquée,  
Université Félix Houphouët-Boigny,  
Abidjan, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>Laboratoire Géosciences et Environnement,  
Université Nangui Abrogoua,  
Abidjan, Côte d'Ivoire

Copyright © 2013 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** This study is made in order to establish a database, which can use as reference value for the current contents in Heavy metals, such as arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), mercury (Hg), manganese (Mn), nickel (Ni), lead (Pb) and zinc (Zn) in the manganese and gold-bearing region of *Blafo-Guéto* at the Center-South part of Côte d'Ivoire. So, the soil Diagnosis based on the pedogeochemistry background, through two lines, the one on the hill Blafo, the other one on the hill Guéto, allowed to know that except the manganese (Mn) and the copper (Cu), the studied heavy metals, does not exceed the naturally indicated limit values and are thus polluted. These measured values are included between 0.2 to 1.9 mg.kg<sup>-1</sup> for Cd, 12 to 56 mg.kg<sup>-1</sup> for Cr, 25 to 299 mg.kg<sup>-1</sup> for Cu, 6000 to 50000 mg.kg<sup>-1</sup> for Mn, 13 to 38 mg.kg<sup>-1</sup> for Ni, 13 to 49 mg.kg<sup>-1</sup> for Pb and 25 to 110 mg.kg<sup>-1</sup> for Zn. For As and Hg, the measured values are lower than 0.25 mg.kg<sup>-1</sup> and, Only Mn and Cu indicated a geochemical anomaly, because exceeding the natural contents in soil. The ranking, in the decreasing order, from the geochemical anomaly to the lowest contents measured in the Blafo-Guéto soils, indicates that: Mn>Cu>Zn>Cr>Pb>Ni>Cd>As, Hg.

**KEYWORDS:** Pedogeochemistry background, Heavy metals, Volcano sedimentary, Blafo-Guéto, Côte d'Ivoire.

**RESUME :** Cette étude a été menée dans la perspective d'établir une base de données pouvant servir de valeur de référence pour les teneurs actuelles en éléments traces métalliques (ETM) tels que l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le Mercure (Hg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et le zinc (Zn), dans les sols de la région aurifère et manganésifère du *Blafo-Guéto*, au Centre-Sud de la Côte d'Ivoire. Ainsi, le diagnostic du fonds pédogéochimique à travers deux toposéquences, l'une sur la colline *Blafo*, l'autre sur la colline *Guéto* a permis de savoir qu'en dehors du manganèse (Mn) et du cuivre (Cu), dans les sols développés dans cette région, les ETM étudiés, ne dépassent pas les valeurs limites naturellement indiquées et ne sont donc pollués. Ces valeurs mesurées sont comprises entre 0,2 à 1,9 mg.kg<sup>-1</sup> pour le Cd, 12 à 56mg.kg<sup>-1</sup> pour le Cr, 25 à 299mg.kg<sup>-1</sup> pour le Cu, 6000 à 50000mg.kg<sup>-1</sup> pour le Mn, 13 à 38 mg.kg<sup>-1</sup> pour le Ni, 13 à 49mg.kg<sup>-1</sup> pour le Pb et 25 à 110 mg.kg<sup>-1</sup> pour le Zn. Quant à l'As et le Hg, les valeurs mesurées sont inférieures à 0,25mg.kg<sup>-1</sup> et, seulement le Mn et le Cu présentent une anomalie géochimique, car excédant les teneurs naturelles dans les sols. Le classement, dans l'ordre décroissant, des concentrations anormales aux teneurs les plus faibles mesurées dans les sols du Blafo-Guéto indique que : Mn>Cu>Zn>Cr>Pb>Ni>Cd>As, Hg.

**MOTS-CLEFS:** Fonds pédogéochimique, ETM, Volcano-sédimentaire, Blafo-Guéto, Côte d'Ivoire.

## 1 INTRODUCTION

Les terrains géologiques volcano-sédimentaires Birimiens de la Côte d'Ivoire, structurés à l'orogénèse éburnéenne [1], [2], regorgent de nombreux gîtes et indices métallifères [3], [4]. Ces terrains, pour la plupart inexplorés jusqu'à la période 1990, se voient actuellement l'objet d'intenses activités de recherche minière. Cependant, différents travaux ont indiqués que l'industrie minière est reconnue pour être un des grands secteurs où l'on peut parler de « *crise de l'environnement* » ([5], [6], [7]-[15]). Dans le cas, par exemple de l'impact sur le sol, des auteurs [16], [17] ont admis et reconnu que les zones d'activités minières avaient un impact négatif, marqué presque exclusivement par la forte concentration en éléments traces métalliques (ETM), un pH très bas, une faible capacité de rétention en eau, une forte conductivité électrique et modifiaient régulièrement le paysage. Aussi, dans le cadre de la gestion et de la valorisation des déchets organiques ou de la gestion appropriée de sites pollués, il est explicitement demandé de se référer à l'état des sols « *naturels* » voisins [18], pour distinguer la part de la contamination des sols propre à l'installation industrielle de celle qui préexistait avant son fonctionnement. Ainsi, connaître le statut d'un sol avant l'installation quelconque d'un projet est très important et peut servir de valeur de référence locale, comme l'ont souligné [19], [20], [21]. C'est donc dans ce cadre, que cette étude est entreprise au *Blafo-Guéto*, au Centre-Sud de la Côte d'Ivoire, dans la région de Toumodi. Cette région tropicale, en plus d'avoir des potentialités aurifères et manganésifères [4], a développé des sols bruns qui suscitent un intérêt scientifique majeur [22]. Il est question dans ce travail, de diagnostiquer ces sols bruns décrits sur les collines « *Blafo* » et « *Guéto* » en s'appuyant sur la pédogéochimie, avec pour objectif d'élaborer un référentiel *sol Blafo-Guéto* en éléments traces métalliques tels que l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le Mercure (Hg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et le zinc (Zn).

## 2 MATERIELS ET METHODES

### 2.1 CARACTERISTIQUES DU SITE DE L'ETUDE

#### 2.1.1 LOCALISATION

L'étude est menée dans la localité de Tokréyaokro sur les collines *Blafo* et *Guéto* (fig. 1). Le village de Tokréyaokro est à 6°48'N et 4°58'O à une altitude de 415 m au-dessus du niveau de la mer et fait partie de la région de Toumodi. Il est plus au Nord de Toumodi et est particulièrement surplombé par les hautes collines du *Blafo* et du *Guéto*.

#### 2.1.2 MORPHOLOGIE DU PAYSAGE

Le contexte géomorphologique dans la localité est dominé par la présence des deux grandes collines *Blafo* et *Guéto* avec l'existence de moyen et haut-glacis. Le plus haut sommet est autour de 501 m, où pour le cas de la colline *Blafo*, d'Est en Ouest, l'altitude varie de 100 à environ 450 m.

#### 2.1.3 GEOLOGIE LOCALE

La région du *Blafo-Guéto* comprend trois (3) domaines géologiques dont les limites suivent la direction birrimienne NNE-SSW. Le premier domaine, situé au niveau des collines *Blafo* et *Guéto*, comprend les formations du complexe volcano-sédimentaire birrimien. Le deuxième domaine est constitué des granites et des migmatites éburnéens, situé de part et d'autre du premier domaine, au sud-est et au nord-ouest. Quant au troisième domaine, il est constitué des schistes arkosiques [23]. Dans l'ensemble les formations rencontrées dans ce sillon sont des schistes, des grès, des quartzites, des conglomérats, des brèches, des roches basiques et acides, tous faiblement métamorphisés.

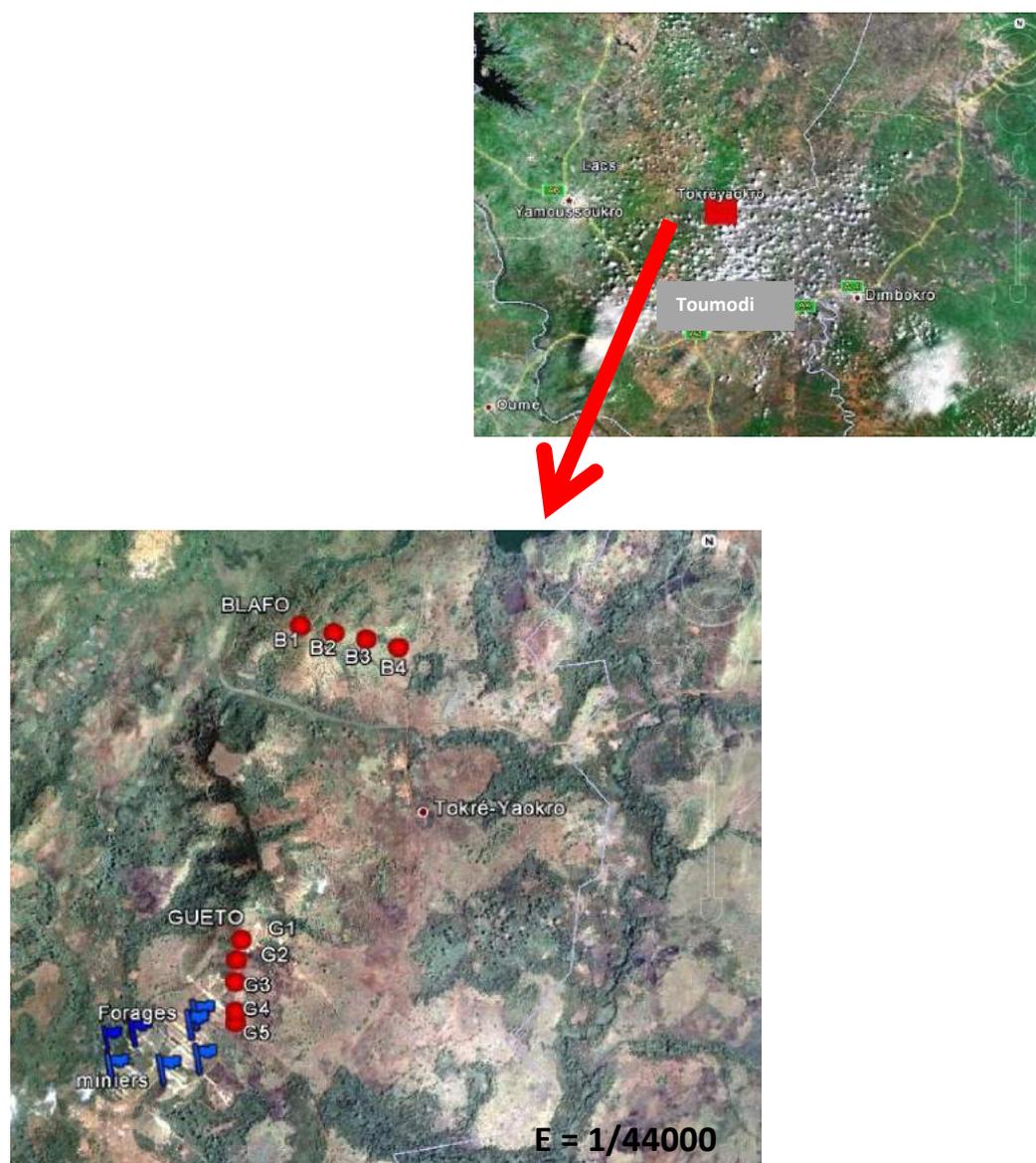


Fig. 1. Localisation du site d'étude

#### 2.1.4 TYPE ET OCCUPATION DES SOLS

Les sols rencontrés au *Blafo-Guétó* sont bruns et eutrophes[22], développés sur la portion volcano-sédimentaire et, pourvus en un fort taux d'éléments grossiers. La région est essentiellement agricole, avec l'existence d'un parc, le parc d'Abokouamékro. En dehors des cultures, le secteur est le témoin d'une végétation arbustive et de reliques de forêt décidue.

#### 2.1.5 ACTIVITES MINIERES

La région du *Blafo-Guétó*, est une région où les indices en manganèse et en or ont été avérés. Concernant l'or, plusieurs travaux de recherche ont été exécutés, avec notamment des campagnes de géochimie sol, de sédiments de ruisseaux, de forages destructifs et carottés. Les travaux exploratoires avancés, ont nécessité l'ouverture de plate-forme de forage (figure 1 et 2) ayant pour conséquence un début de dégradation de l'environnement par érosion et une accumulation de débris de roche en surface (figure 3).

## 2.2 DEMARCHE METHODOLOGIQUE

### 2.2.1 PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS SOLS

Les échantillons sols prélevés sur le terrain, sont ceux issus de fosses pédologiques ouvertes sur chacune des collines *Blafo* et *Guéto*. L'ouverture des fosses s'est faite suivant deux toposéquences (fig. 1) en respectant les normes d'un dispositif stratifié par segment topographique (sommet, haut de versant, mi versant et bas de versant). La toposéquence de la colline *Blafo* est à une direction de 108°N avec 4 fosses pédologiques notées du sommet vers le bas de versant B1, B2, B3 et B4. Quant à celle du *Guéto*, elle est à 185°N et composée de 5 fosses numérotées G1, G2, G3, G4 et G5. Ces toposéquences ont été étudiées selon la méthode de [24], et les échantillons prélevés sont représentatifs des horizons décrits. Au total 40 échantillons ont été prélevés pour une répartition de 20 échantillons au *Blafo* et de 20 échantillons au *Guéto*.



Fig. 2. Plate-forme de forage minier



Fig. 3. Forte érosion du sol

### 2.2.2 ANALYSE QUANTITATIVE GLOBALE DES METAUX

Les échantillons sols soumis à l'analyse ont, dans un premier temps été séchés à l'ombre, à l'air libre pendant 14 jours, puis tamisés à la maille de 2 mm. Ensuite, la partie fine recueillie a été broyée, tamisée à 63  $\mu\text{m}$  et environ 0.3 g a été digérée selon la méthode AIEA pour l'analyse. Cette analyse a été effectuée par Spectrométrie d'Absorption Atomique à Flamme (SAAF) et opérée trois fois pour chaque échantillon. Les éléments recherchés sont : As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn.

### 2.2.3 TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES

Les résultats d'analyse obtenus au laboratoire ont été traités à l'aide du logiciel Statistica 7.1et, pour des besoins d'identification, les tranches d'horizons (échantillons) sont numérotées en utilisant la lettre H, suivie du numéro d'ordre(en chiffre) de l'horizon. Les différences de concentration en éléments traces métalliques des échantillons ont été examinées au travers d'une analyse de la variance (ANOVA), suivies lorsqu'elles étaient significatives par le test de comparaison LSD de Fischer, qui permet d'identifier la ou (les) variable(s) très significativement différente(s) des autres. Les moyennes des variables ont été séparées au seuil  $\alpha = 0,05$ . Les considérations de compréhension du statut des sols en ces différents ETM, ont amené à apprécier la dynamique verticale et latérale, qui elle, distingue la concentration en chaque ETM selon les horizons humifères (Hs) et non humifères (Hp).

## 3 RESULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 DYNAMIQUE VERTICALE DES ETM ETUDIÉS

Les valeurs moyennes indiquant la concentration en chaque élément trace métallique étudié, par tranche d'horizon et par profil de sol sont indiquées dans les tableaux I et II.

Toutes les valeurs indiquées dans ces tableaux, à l'exception de la teneur en cuivre (Cu), que ce soit au *Blafo* ou au *Guétó*, expriment une différence significative au seuil de  $\alpha = 0,05$ . Notons aussi que le mercure (Hg) et l'arsenic (As), ont des valeurs inférieures à  $0,25 \text{ mg.kg}^{-1}$ . La dynamique verticale des ETM étudiés est la suivante :

- Au niveau du *Blafo* : les éléments Cd, Cr, Mn, Pb, Zn du profil du sommet (B1) ont des teneurs qui décroissent de l'horizon de surface vers les horizons profonds. Cette situation est la même pour le Cd, au niveau du profil de haut de versant (B2). En revanche, les concentrations élevées pour le Pb concernent les 5 premiers horizons, et pour les autres éléments, les concentrations fortes sont plus en profondeur. Pour le profil de moyen versant (B3), la situation est inverse pour le Cd, où les teneurs élevées sont au niveau des horizons profonds. Seul, le Cu ne s'y apparente pas. Le Mn et le Zn décroissent de la surface vers la profondeur. Quant aux éléments Cr, Ni, ils sont abondants aux horizons intermédiaires. Au niveau du profil plus bas (B4), les horizons intermédiaires sont plus concentrés en ces éléments.

**Tableau 1. Valeur moyenne des ETM étudiés au Blafo par tranche d'horizon**

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Concentration en $\text{mg.kg}^{-1}$								
			As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
B1	H1	0 - 5	<0,25	1,34	24,42	80,90	<0,25	11166,65	30,90	29,30	76,08
	H2	5 - 20	<0,25	1,01	18,67	118,96	<0,25	10543,21	20,89	21,73	77,71
	H3	20 - 39	<0,25	0,20	16,56	74,79	<0,25	10879,19	23,20	16,90	74,72
	H4	39 - 70	<0,25	0,62	13,85	93,27	<0,25	7176,55	25,92	11,33	48,16
B2	H1	0 - 7	<0,25	2,00	19,66	163,20	<0,25	13057,99	24,64	51,59	88,86
	H2	7 - 20	<0,25	0,24	18,33	102,41	<0,25	11050,86	28,54	33,68	76,00
	H3	20 - 50	<0,25	1,14	42,81	106,65	<0,25	13498,37	27,64	35,80	91,03
	H4	50 - 60	<0,25	0,63	22,88	164,06	<0,25	13261,76	48,96	37,60	92,64
	H5	60 - 100	<0,25	0,68	34,40	104,20	<0,25	8496,82	26,99	18,57	51,06
B3	H1	0 - 10	<0,25	0,62	13,97	146,67	<0,25	15051,94	24,48	29,11	101,67
	H2	10 - 22	<0,25	0,20	20,05	178,38	<0,25	14527,26	28,94	25,05	105,94
	H3	22 - 35	<0,25	1,17	46,43	84,82	<0,25	11176,84	31,39	32,88	75,90
	H4	35 - 55	<0,25	0,37	38,20	77,11	<0,25	12423,32	25,56	12,53	89,86
	H5	55 - 70	<0,25	1,71	33,68	98,46	<0,25	9644,85	21,31	24,16	56,87
	H6	70 - 120	<0,25	1,21	12,71	92,93	<0,25	7515,80	12,85	21,45	36,46
B4	H1	0 - 5	<0,25	1,35	26,88	68,03	<0,25	8189,36	20,74	29,79	49,76
	H2	5 - 15	<0,25	0,09	25,90	75,54	<0,25	9695,84	14,40	24,92	19,80
	H3	15 - 30	<0,25	1,01	22,04	162,68	<0,25	9555,96	27,76	28,96	74,44
	H4	30 - 50	<0,25	0,06	20,24	121,41	<0,25	10123,20	20,52	30,87	64,94
	H5	50 - 70	<0,25	1,06	28,42	123,21	<0,25	7926,31	16,08	14,61	42,09

- Au niveau du *Guétó* : pour le profil de haut de versant (G1), les concentrations fortes en Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn, se rencontrent au niveau des 2 premiers horizons de surface. Pour le Pb, les horizons les plus profonds sont les plus concentrés.

Le Zn et le Cu, ont également leurs horizons de profondeur fortement concentrés. Concernant le profil de haut de versant (G2), les plus fortes concentrations en Cd, Cu, Mn, Pb, Zn sont dans les horizons supérieurs. Aussi, le Cu et le Pb sont forts élevés dans le dernier horizon le plus profond. Le Cr est très concentré dans les horizons de profondeur et le Ni dans les horizons intermédiaires. Les éléments Cd, Cr, Mn, Ni, Pb, Zn sont très concentrés dans les 2 premiers horizons de surface au niveau du profil G3. Seul le Cu est élevé dans les horizons de profondeur. Au niveau du profil G4, le Cd, le Cu, le Mn et le Zn sont forts concentrés dans les 3 derniers horizons. Le Cr et le Ni, plus riches dans les 2 premiers horizons. Quant au Pb, il est plus concentré dans les horizons intermédiaires. Les éléments Cu, Mn, Ni, Pb et Zn sont plus concentrés dans l'horizon de surface du profil de bas de versant (G5). Par contre le Cd et le Cr sont plus concentrés en profondeur.

**Tableau 2. Valeur moyenne des ETM étudiés au Guéto par tranche d'horizon**

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Concentration en mg.kg <sup>-1</sup>								
			As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
G1	H1	0 - 10	<0,25	1,34	16,67	195,30	<0,25	8811,28	26,11	14,44	53,34
	H2	10 - 25	<0,25	1,27	26,65	139,61	<0,25	9398,65	14,93	19,71	47,43
	H3	25 - 40	<0,25	0,07	15,11	101,74	<0,25	4734,32	13,62	22,57	26,94
	H4	40 - 65	<0,25	0,25	12,97	146,67	<0,25	5302,79	14,64	21,87	35,64
	H5	65 - 120	<0,25	0,50	18,42	133,67	<0,25	6779,31	12,62	35,29	39,35
G2	H1	0 - 10	<0,25	1,23	14,89	113,69	<0,25	6412,27	18,03	23,61	45,16
	H2	10 - 25	<0,25	1,67	15,70	81,40	<0,25	4930,82	26,87	20,52	30,00
	H3	25 - 43	<0,25	1,63	18,05	92,80	<0,25	8408,91	18,48	24,43	47,99
	H4	43 - 70	<0,25	0,64	17,79	102,33	<0,25	5149,76	27,86	19,29	30,09
	H5	70 - 160	<0,25	0,20	20,03	116,08	<0,25	4229,58	15,00	41,95	28,59
G3	H1	0 - 20	<0,25	1,99	57,07	45,53	<0,25	14538,74	23,86	25,58	95,20
	H2	20 - 60	<0,25	0,62	38,02	218,01	<0,25	15572,69	36,05	20,09	106,76
	H3	60 - 100	<0,25	0,26	16,71	188,85	<0,25	8909,99	17,89	18,81	51,23
	H4	100 - 200	<0,25	0,40	15,20	263,46	<0,25	10178,60	18,23	16,79	74,00
G4	H1	0 - 15	<0,25	0,05	30,16	98,23	<0,25	6502,68	21,92	13,10	35,48
	H2	15 - 47	<0,25	0,55	38,91	120,80	<0,25	7243,58	26,97	23,81	47,76
	H3	47 - 100	<0,25	2,51	20,08	107,53	<0,25	5903,16	16,31	48,51	34,49
	H4	100 - 140	<0,25	1,09	13,77	168,21	<0,25	11151,49	31,55	13,26	76,92
G5	H1	0 - 15	<0,25	1,24	39,49	117,32	<0,25	8781,15	31,31	44,38	52,90
	H2	15 - 200	<0,25	1,98	49,98	86,83	<0,25	7616,13	19,43	42,49	42,61

### 3.2 DYNAMIQUE LATÉRALE DES ETM ETUDIÉS

Les tableaux III et IV représentent les valeurs moyennes des différents ETM étudiés par profil et par tranche d'horizons humifères et non humifères. La couverture latérale de ces ETM a donc été appréciée depuis le sommet de chaque colline jusqu'au bas de versant. Les études statistiques, notamment l'analyse de la variance, ont indiquées une différence significative pour chaque ETM, au seuil de la probabilité  $\alpha = 0,05$ , à l'exception du Cu. Les figures 4 et 5 sont donc la représentation de la dynamique latérale de ces ETM au *Blafo* et au *Guéto*. Sur le site du *Blafo*, les concentrations en Cd, Pb, Mn et Zn sont plus élevées dans les horizons humifères du sommet jusqu'au bas de versant. En revanche le Cr est plus concentré dans les horizons profonds du haut de versant au bas de versant. Au niveau du Cu et du Ni, ils sont plus concentrés dans l'horizon humifère du moyen versant.

Au niveau du *Guéto*, le Cd est concentré du sommet au moyen versant dans l'horizon humifère, de même que le Mn, le Zn et le Cr. Le Ni est concentré de sommet au bas de versant dans l'horizon humifère. Quant au plomb, c'est seulement au niveau du moyen versant qu'il est plus concentré dans l'horizon humifère. Enfin, le Cu est mieux concentré dans les horizons de profondeur du sommet au tiers inférieur du moyen de versant.

**Tableau 3. Valeur moyenne par horizons humifères et non humifères et par profils ETM étudiés au Blafo**

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Concentration en mg.kg <sup>-1</sup>								
			As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
B1	Hs	0 - 39	<0,25	0,85	19,88	91,55	<0,25	10863,01	24,99	22,64	76,17
	Hp	39 - 70	<0,25	0,62	13,84	93,26	<0,25	7176,55	25,92	11,33	48,15
B2	Hs	0 - 50	<0,25	1,12	26,93	124,08	<0,25	12535,74	26,94	40,35	85,29
	Hp	50 - 100	<0,25	0,66	28,64	134,13	<0,25	10879,29	37,97	28,08	71,85
B3	Hs	0 - 22	<0,25	0,41	17,01	162,53	<0,25	14789,6	26,71	27,08	103,8
	Hp	22 - 120	<0,25	0,41	32,75	88,33	<0,25	10190,2	22,77	22,75	64,77
B4	Hs	0 - 15	<0,25	0,72	26,39	71,79	<0,25	8942,6	17,57	27,35	34,77
	Hp	15 - 70	<0,25	0,7	23,56	135,76	<0,25	9201,82	21,45	24,81	60,49

**Tableau 4. Valeur moyenne par horizons humifères et non humifères et par profil des ETM étudiés au Guéto**

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Concentration en mg.kg <sup>-1</sup>								
			As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
G1	Hs	0 - 40	<0,25	0,89	19,47	145,54	<0,25	7648,08	18,22	18,9	42,57
	Hp	40 - 120	<0,25	0,37	15,69	140,17	<0,25	6041,05	13,63	28,58	37,5
G2	Hs	0 - 43	<0,25	1,51	16,21	95,96	<0,25	6584	21,12	24,52	41,05
	Hp	43 - 160	<0,25	0,42	18,91	109,21	<0,25	4689,67	21,43	30,62	29,34
G3	Hs	0 - 60	<0,25	1,3	47,55	131,77	<0,25	15055,72	29,95	22,83	100,98
	Hp	60 - 200	<0,25	0,33	15,95	226,15	<0,25	9544,3	18,06	17,8	62,62
G4	Hs	0 - 47	<0,25	0,3	34,54	109,51	<0,25	6873,13	24,44	18,46	41,62
	Hp	47 - 140	<0,25	1,8	16,92	137,87	<0,25	8527,33	23,93	30,89	55,7
G5	Hs	0 - 15	<0,25	1,24	39,48	117,32	<0,25	8781,15	31,31	44,38	52,9
	Hp	15 - 200	<0,25	1,97	49,97	86,82	<0,25	7616,13	19,43	42,49	42,61

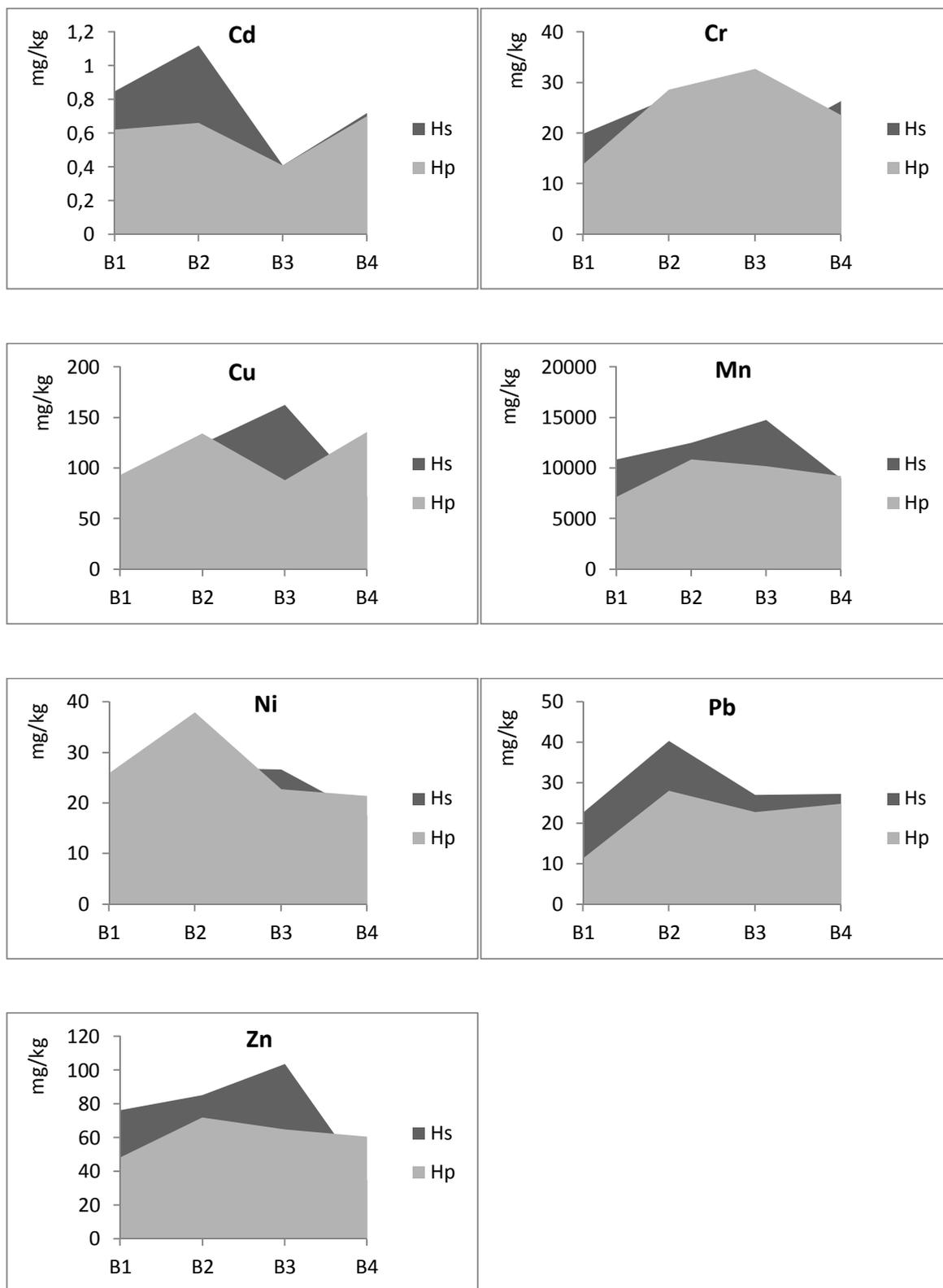


Fig. 4. Couverture latérale des ETM étudiés par tranche d'horizon humifère et non humifère du sommet au bas de versant de la colline Blafo

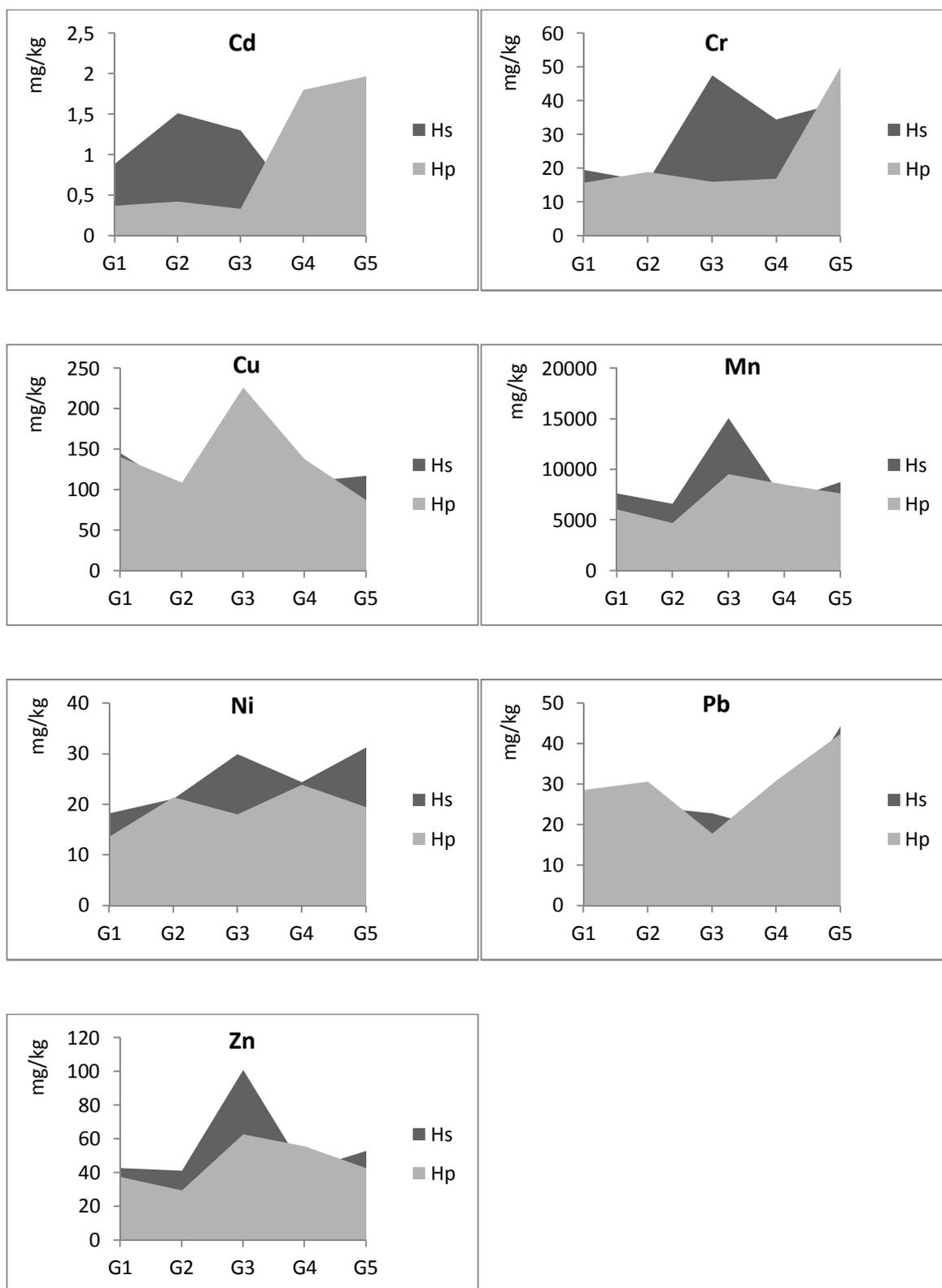


Fig. 5. Couverture latérale des ETM étudiés par tranche d'horizon humifère et non humifère du sommet au bas de versant de la colline Guétó

### 3.3 DISCUSSION

L'appréciation de la dynamique verticale et latérale des ETM étudiés au Blafo-Guétó, nous indique, de façon générale que les sols de ce secteur ne sont pas pollués en ces éléments. En effet, la part géogène des ETM étudiés, à partir des moyennes des teneurs totales en ces éléments dans les horizons de surface et de profondeur, est inférieure aux teneurs naturelles indiquées communément dans les sols. D'après [25], Les teneurs naturelles des sols en Pb sont en moyenne de  $32 \text{ mg.kg}^{-1}$  et varient entre  $10$  et  $67 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Dans notre cas, ces teneurs varient jusqu'à  $44 \text{ mg.kg}^{-1}$  avec une forte concentration dans les horizons de surface. Ce constat est d'autant plus vrai que [26] ont indiqué une forte réactivité entre le Pb et la matière organique, ponctuée par une faible solubilité et mobilité du Pb [27].

Au niveau du Zn, [28] évalue la teneur moyenne à  $50 \text{ mg.kg}^{-1}$  en indiquant que les teneurs naturelles dans les sols varient entre  $10 \text{ mg.kg}^{-1}$  et  $300 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Dans les sols étudiés, les teneurs se retrouvent dans cette fourchette avec un maximum de  $106 \text{ mg.kg}^{-1}$ . L'étude de la dynamique verticale du Zn fait ressortir une forte concentration dans l'horizon enrichi en argile, démontrant son caractère mobile tel qu'indiqué par [29].

Selon [30], les teneurs naturelles de cadmium dans les sols sont comprises entre  $0,06$  et  $1,1 \text{ mg.kg}^{-1}$  et comparées à nos valeurs mesurées, elles s'y accordent en dehors du site *Guétó*, où nous avons une concentration allant jusqu'à  $1,97 \text{ mg.kg}^{-1}$  au bas de versant. Ce constat pourrait s'expliquer par la rétention du Cd par les hydroxydes de fer, telle qu'indiqué par [28]. En effet les profils G4 et G5, ont des horizons à induration de fer.

Concernant l'As, [31] situe la valeur moyenne à  $6 \text{ mg.kg}^{-1}$ , en indiquant une variation comprise entre  $0,1$  et  $40 \text{ mg.kg}^{-1}$  et, dans nos sols étudiés, les valeurs en As sont inférieures à  $0,25 \text{ mg.kg}^{-1}$ . C'est le même constat pour le Hg, où [32] a indiquées les valeurs limites à  $1 \text{ mg.kg}^{-1}$ .

Aussi [32], signifie les valeurs limites du Cr, Cu, Ni, respectivement à  $150 \text{ mg.kg}^{-1}$ ,  $100 \text{ mg.kg}^{-1}$  et  $50 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Ces valeurs indiquées sont largement supérieures à celles que nous avons mesurées pour le Cr et le Ni en dehors, du Cu dont quelques valeurs vont jusqu'à  $226 \text{ mg.kg}^{-1}$ . On peut donc parler, pour le cas du Cu, d'un phénomène d'anomalie géochimique.

Ce même phénomène est observé pour le Mn, où nous avons des teneurs arrivant jusqu'à  $15000 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Le Mn, est naturellement présent dans les sols et peut contenir entre  $770$  et  $1000 \text{ mg.kg}^{-1}$ , tel que constaté au Québec par [33]. Au-delà il présente une anomalie. Dans notre cas, les deux sites *Blafo* et *Guétó* sont au-delà de ces valeurs avec, le cas du site *Blafo* plus accentué.

#### 4 CONCLUSION

Définir la base référentielle du fond pédogéochimique actuel des sols développés dans l'espace volcano-sédimentaire du *Blafo-Guétó* a été un sujet particulièrement intéressant. Ainsi, cette étude permettra de guider et d'orienter, en cas de besoin, une quelconque gestion de cet environnement. Les sols au *Blafo* et au *Guétó*, comme il a été démontré, en l'état actuel, ne sont pas pollués en arsenic (As), en cadmium (Cd), en chrome (Cr), en Mercure (Hg), en nickel (Ni), en plomb (Pb) et en zinc (Zn). Seuls, le manganèse (Mn) et le cuivre (Cu) présentent un phénomène d'anomalie géochimique. Les concentrations pour le Mn sont plus élevées dans les horizons humifères et le Cu, dans les horizons de profondeur.

#### REFERENCES

- [1] I. Yacé, "Le volcanisme Eburnéen dans les parties centrales et méridionales de la chaîne précambrienne de Fètèkro en Côte d'Ivoire," *Thèse de Doctorat d'Etat. Univ Abidjan*. 373 p, 1976.
- [2] I. Yacé, "Initiation à la géologie. L'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest. Pétrologie, Géologie régionale," Ed. CEDA, SODEMI, 183p, 2002.
- [3] L.Zanone, "Le manganèse de Côte d'Ivoire," Rapport multigr. SODEMI. no.44 et 44 bis, 273 p, 1964.
- [4] G. Grandin et E. A. Perseil, "Les Minéralisations Manganésifères Volcano-sédimentaires du Blafo-Guétó (Côte d'Ivoire) - Paragenèses - Altération Climatique," *Mineral. Deposita* 18, 99-111, 1983.
- [5] S. Dudka and D. C. Adriano, "Environmental impacts of metal ore mining and processing: A review," *Journal of Environmental Quality*, 26, 590-602.1997.
- [6] M. C. Navarro, C. Perez-Sirvent, M. J. Martinez-Sanchez, J. Vidal, P. J. Tovar and J. Bech, "Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone," *Journal of Geochemical Exploration*, 96, 183-193. doi:10.1016/j.gexplo.2007.04.011. 2008.
- [7] C.B. Braungardt, E. P. Achterberg, F. Elbaz-Poulichet and N.H. Morley, "Metal geochemistry in a mine-polluted estuarine system in Spain," *Applied Geochemistry* 18(11): 1757-1771, 2003.

- [8] D.W. Blowes, C.J. Ptacek, J.L. Jambor and C.G. Weisener, "The Geochemistry of acid mine drainage," In: Lollar, B.S. (Ed.), *Environmental Geochemistry. Holland, H.D., Turekian, K.K. (Exec. Eds.), Treatise on Geochemistry, vol. 9. Elsevier, Amsterdam*, pp. 149–204, 2004.
- [9] R. Figueira and T. Ribeiro, "Transplants of aquatic mosses as biomonitors of metals released by a mine effluent," *Environmental Pollution* 136(2): 293-301, 2005.
- [10] A. J. Desbarats, M. B. Parsons, J. B. Percival, S. Beauchemin and Y.T. J. Kwong, "Geochemistry of mine waters draining a low-sulfide, gold-quartz vein deposit, Bralorne, British Columbia," *Applied Geochemistry*, 26 (2011) 1990–2003, 2011.
- [11] S. A. Shaw, M. J. Hendry, J. Essilfie-Dughan, T. Kotzer and D. Wallschläger, "Distribution, characterization, and geochemical controls of elements of concern in uranium mine tailings, Key Lake, Saskatchewan, Canada," *Applied Geochemistry* 26 (2011) 2044–2056, 2011.
- [12] A. Gómez-Álvarez, J. L. Valenzuela-García, D. Meza-Figueroa, M. O-Villanueva, J. Ramírez-Hernández, J. Almendariz-Tapia y E. Pérez-Segura, "Impact of mining activities on sediments in a semi-arid environment: San Pedro River, Sonora, Mexico," *Appl. Geochem.* 26, 2101–2112, 2012.
- [13] J. Bech, N. Roca, J. Barceló, P. Duran, P. Tume and C. Poschenrieder, "Soil and plant contamination by lead mining in Bellmunt, Western Mediterranean Area," *J. Geochem. Explor.* 113, 94–99, 2012.
- [14] G. Qiu, X. Feng, B. Meng, J. Sommar and C. Gu, "Environmental geochemistry of an active Hg mine in Xunyang, Shaanxi Province, China," *Appl. Geochem*, 27, 2280–2288, 2012.
- [15] O. R. Salinas Villafane, T. Igarashi, M. Kurosawa and T. Takase, "Comparison of potentially toxic metals leaching from weathered rocks at a closed mine site between laboratory columns and field observation," *Applied Geochemistry*, 27 (2012) 2271–2279, 2012.
- [16] W. H. O. Ernst, "Bioavailability of heavy metals and decontamination of soils by plants," *Applied Geochemistry*, 11(1–2), 163–167, 1996.
- [17] H. M. Conesa, Á. Faz, R. Arnauld, "Heavy metal accumulation and tolerance in plants from mine tailings of the semiarid Cartagena–La Union mining district (SE Spain)," *Science of the Total Environment*, 366(1), 1–11, 2006.
- [18] G. Colinet, J. Laroche, B. Toussaint, M-J. Goffaux, M. Martinez, R. Oger, "Base de données sols de REQUASUD. Deuxième synthèse," *REQUASUD*, Gembloux, Belgique, 36p, 2004.
- [19] D. Baize, "Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France)," *Paris: INRA*, 408 p, 1997.
- [20] D. Baize et M. Tercé, "Un point sur les éléments traces métalliques dans les sols : approches fonctionnelles et spatiales," *INRA éditions*, 565 p, 2002.
- [21] D. Baize et T. Sterckeman, "Importance de la détermination du fond pédogéochimique pour évaluer la pollution des sols par les métaux. L'exemple du site de Dornach," *Bulletin Société Suisse de Pédologie*, n° 27 : 63-68, 2004.
- [22] A. Yao-Kouamé, B. Koné et T. J. Gala Bi, "Caractérisation morphopédologique des sols bruns eutrophes développés sur les complexes volcano-sédimentaires ouest africains du birrimien à Blafo en Côte d'Ivoire," *Africa Geoscience Review*, Vol. 18, N°1, 23-32, 2011.
- [23] G. Grandin, "Aplanissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'ouest," *Mém. ORSTOM* 82, 275 p. 1976.
- [24] R. Boulet, A. Chauvel, F-X. Humbel, Y. Lucas, "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," *Cah. ORSTOM.*, ser. Pedol., vol. XIX, n°4, 1982 : 309-321. 1982.
- [25] A. Kabata-Pendias, H. Pendias, "Trace metals in soils and plants," *CRC Press*, Boca Raton, Fla, USA, 2<sup>nd</sup> edition, 2001.
- [26] G. M. Hettiarachchi, G. M. Pierzynski, "In situ stabilization of soil lead using phosphorus and manganese oxide: influence of plant growth," *Journal of Environmental Quality*, 31, 564-572, 2002.
- [27] S. H. Badawy, M. I. D. Helal, A. M. Chaudri, K. Lawlor, S. P. McGrath, "Soil solid-phase controls lead activity in soil solution," *J. Environ. Qual.*, 31, 162-167, 2002.
- [28] D.C. Adriano, "Trace elements in the Terrestrial Environment. *Springer Verlag*, New York, 866p, 2001.
- [29] C. Fernandez-Cornudet, "Devenir du Zn, Pb et Cd issus de retombées atmosphériques dans les sols, à différentes échelles d'étude. Influence de l'usage des sols sur la distribution et la mobilité des métaux," *Thèse de Doctorat de L'INA-PG*, 171p, 2006.
- [30] I. Pais, J. J. Benton, "The handbook of Trace Elements," *Boca Raton, FL, St. Lucie Press*, 223p, 2000.
- [31] H. J. M. Bowen, "Elemental Chemistry of the Elements," *Academic Press*, London, New York, 60-61, 1979.
- [32] D. Baize, "Teneur totales en métaux lourds dans les sols français 2000 : résultats généraux du programme ASPITET," *Le courrier de l'environnement n°39*, p. 39-54, 2000.
- [33] J. Choinière, M. Beaumier, "Bruits de fond géologiques pour différents environnements géologiques au Québec," *Québec: Ministère des Ressources naturelles*, 1997.

## **2<sup>ème</sup> PUBLICATION TIRÉE DE LA THÈSE**

**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-Guétó* (Toumodi) dans le centre-sud de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal* vol.9, N°9, pp. 18-30.

# **CARACTERES MACROMORPHOLOGIQUES DES SOLS DEVELOPPES SUR FONDS VOLCANO-SEDIMENTAIRE AU BLAFO-GUETO (TOUMODI) DANS LE CENTRE-SUD DE LA COTE D'IVOIRE**

***Kouakou Yao Kouman Nestor***

***Yao Guy Fernand***

Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan/Laboratoire de Pédologie et de Géologie  
Appliquée

***Nangah Krogba Yves***

Université Nangui Abrogoua d'Abidjan/Laboratoire Géosciences et Environnement

***Dr. Baka Derving***

Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan/Laboratoire des Sciences et Techniques de  
l'Eau et de l'Environnement

***Adingra Achille***

Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan/Laboratoire de Géologie Marine et de  
Sédimentologie

***Prof. Yao-Kouame Albert***

Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan/Laboratoire de Pédologie et de Géologie  
Appliquée

---

## **Abstract**

In order to appreciate the current status of developed soil in the manganese and gold-bearing region of *Blafo-Gueto* at the Center-South part of Côte D'Ivoire, this study is undertaken and concerned some macromorphological parameter characterization. Based on the field description of these macromorphological parameters, by opening soil profile through two lines, the one on the hill Blafo, the other one on the hill Guéto, it was shown that the soil are reshaped and in brown color. The soil structures are lumpy in humus horizons which go to 30-40 cm. On the other hand, the structure is polyhedral subangular in intermediate and deep horizons. The drainage class is good in the humus or surface horizons and all the soil texture goes from sandy clayey to clayey soil. The percentage of the unrefined elements is

beyond 60 and the hydromorphic spots, signs of a bad internal drainage begin to appear from the intermediate or accumulate horizons.

---

**Keywords:** Macromorphology, Soil, Volcano-sedimentary, Profile, Brown soil, Blafo-Gueto, Ivory Cost

---

### **Résumé**

Dans le but d'apprécier le statut actuel des sols développés dans la région aurifère et manganésifère du Blafo-Guétó au Centre-Sud de la Côte d'Ivoire, cette étude est entreprise et porte sur la caractérisation des certains paramètres macromorphologiques. Sur la base de ces caractères macromorphologiques décrits sur le terrain, à l'aide de l'ouverture de fosses pédologiques au travers de deux toposéquences, l'une sur la colline Blafo, l'autre sur la colline Guétó, il a été démontré que ces sols sont tous brunifiés, remaniés et rajeunis. Les structures des sols sont grumeleuses dans les horizons humifères qui vont jusqu'à 30-40 cm. En revanche, dans les horizons intermédiaires et de profondeur, la structure est polyédrique subanguleuse. La classe de drainage est bonne dans ces horizons humifères ou de surface, et la texture des sols est dans l'ensemble argilo-sablo-limoneuse à argileuse. Le pourcentage des éléments grossiers est au-delà de 60 et les taches d'hydromorphie, signe d'un mauvais drainage interne commencent à apparaître à partir des horizons intermédiaires ou d'accumulation.

---

**Mots - clés:** Macromorphologie, Sol, Volcano-sédimentaire, Profil, Brunifié, Blafo-Guétó, Côte d'Ivoire

### **Introduction**

En Côte d'Ivoire, les terrains géologiques volcano-sédimentaires Birrimiens regorgent de nombreux gîtes et indices métallifères (Zanone, 1964 ; Sonnendruker, 1968) qui sont l'objet d'exploration ou d'exploitation minière. C'est par exemple, le cas de la région du *Blafo-Guétó*, au Centre-Sud de la Côte d'Ivoire où, les potentialités manganésifères (Grandin et Perseil, 1983) et aurifères sont avérées. Or, comme le soulignent Ernst (1996), Saïdi et *al.* (2002), Bouabdli et *al.* (2004), Conesa et *al.* (2006), Qiu et *al.*, 2012 ; Salinas Villafane et *al.* (2012), l'activité minière est un facteur qui dégrade l'environnement. Cette action dégradante, au niveau du sol, l'affecte par la contamination en différents éléments traces métalliques (Bech et *al.*, 2012 ; Gómez-Álvarez et *al.*, 2012), par la forte érosion, par la modification régulière et importante du paysage environnant et l'expose. Ainsi, pour des questions de réhabilitation future ou pour des questions d'aménagement après activités, l'on

peut avoir besoin de connaître les conditions initiales préexistantes avant l'installation quelconque d'un projet qui peut servir de valeur de référence locale. C'est donc conscient de ce problème, que cette étude est entreprise au *Blafo-Guétó* où, différents travaux d'exploration sont exécutés actuellement. Il s'agira principalement, de caractériser quelques traits macromorphologiques initiaux et actuels des sols développés en se basant par exemple, sur la couleur, la texture, la structure, le drainage interne.

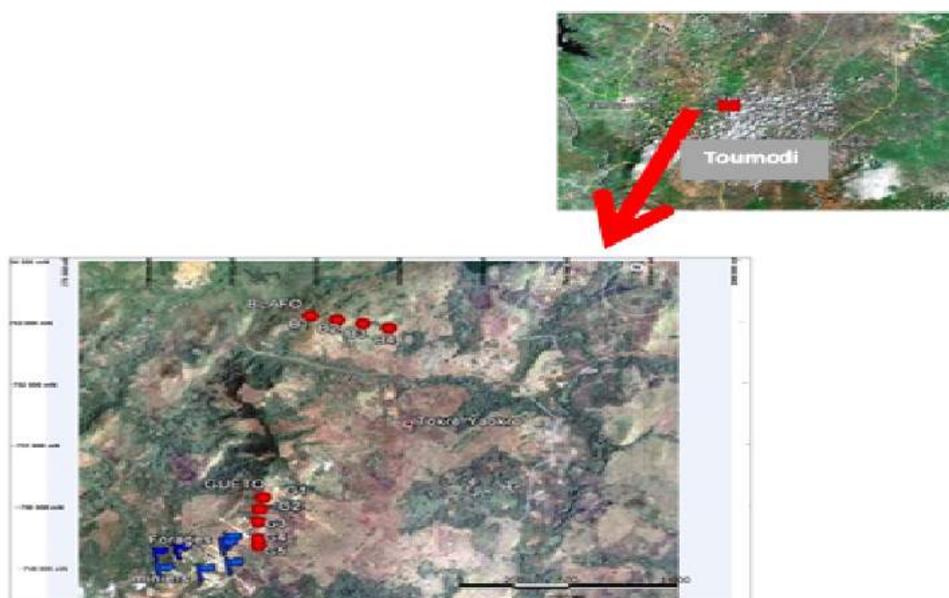
### **Descriptif du site de l'étude:**

#### **Cadre géographique**

Le site de l'étude jouxte le village de Tokréyaokro (fig.1). Ce village est à 6°48'N et 4°58'O et fait partie de la région de Toumodi. Il est plus au Nord de Toumodi et est particulièrement surplombé par les hautes collines du *Blafo* et du *Guétó* sur lesquelles se sont faites les observations.

#### **Climat et végétation**

Le secteur du *Blafo-Guétó* est soumis à un climat équatorial de transition atténué (climat Baouléen) (Leblond, 1984), avec une température moyenne d'environ 26°C. L'humidité y varie, de 75 à 85 % avec des chutes à 40 % en période d'harmattan (vent sec et dominant) et de 80 à 85 % en période pluvieuse (BNETD, 2001). Quant à la végétation, elle est le reflet de cette transition climatique et fait partie de l'écozone de contact forêt-savane (N'Guessan, 1990). Le secteur est donc le témoin d'une végétation arbustive et de reliques de forêt décidue.



**Fig. 1.** Localisation du site d'étude

### **Morphologie du paysage**

Le contexte géomorphologique dans la localité est dominé par la présence des deux grandes collines *Blafo* et *Guéto* avec l'existence de moyen et haut-glacis. Le plus haut sommet est autour de 501 m, où pour le cas de la colline *Blafo*, d'Est en Ouest, l'altitude varie de 100 à environ 450 m.

### **Géologie locale**

La vaste région du *Blafo-Guéto* est composée d'un complexe géologique comprenant trois (3) domaines dont les limites suivent la direction birrimienne NNE-SSW. Le premier domaine, situé au niveau des collines *Blafo* et *Guéto*, comprend les formations du complexe volcano-sédimentaire birrimien. Le deuxième domaine est constitué des granites et des migmatites éburnéens, situé de part et d'autre du premier domaine, au sud-est et au nord-ouest. Quant au troisième domaine, il est constitué des schistes arkosiques. Dans l'ensemble les formations rencontrées dans ce sillon sont des schistes, des grès, des quartzites, des conglomérats, des brèches, des roches basiques et acides, tous faiblement métamorphisés.

### **Activités minières**

La région du *Blafo-Guéto*, est une région où les indices en manganèse et en or ont été avérés. Concernant l'or, plusieurs travaux de recherche ont été exécutés, avec notamment des campagnes de géochimie sol, de sédiments de ruisseaux, de forages destructifs et carottés. Les travaux exploratoires avancés, ont nécessité l'ouverture de plate-forme de forage (fig. 2) ayant pour conséquence un début de dégradation de l'environnement par érosion et une accumulation de débris de roche en surface (fig. 3a et 3b).



**Fig.2.** Plate-forme de forage minier



**Fig.3.** Forte érosion du sol

### **Préparation des coupes d'observation**

L'observation des coupes de sol (profils ou fosses), permettant d'étudier les caractères macromorphologiques, s'est faite suivant deux toposéquences (fig. 1) en respectant les normes d'un dispositif stratifié par segment topographique (sommet, haut de versant, mi-versant et bas de versant), tel que décrit par Ruhe et Walker (1968). Ainsi, au niveau de la colline *Blafo*, la toposéquence est à une direction de 108°N avec 4 fosses pédologiques notées du sommet vers le bas de versant, B1, B2, B3 et B4. Quant à celle du *Guéto*, elle est à 185°N et composée de 5 fosses numérotées G1, G2, G3, G4 et G5. Ces fosses pédologiques ont été exclusivement réalisées sous la végétation naturelle avec des profondeurs variant de 0,7 m à 1,2 m au *Blafo* et de 1,2 m à 2 m au *Guéto*. Et, ces toposéquences ont été étudiées selon la méthode de Boulet et al. (1982).

### **Caractères observés**

Les caractères macromorphologiques ont été observés sur le terrain et ont porté sur la couleur, la structure, la texture, la cohésion, la porosité, la limite entre les couches et le drainage interne. Ces éléments ont donc permis de délimiter les horizons ou couches. La couleur, déterminée à l'aide du code Munsell, a permis de renseigner sur la présence ou non de matière organique dans les horizons et a contribué à d'indiquer le nom de chaque horizon et au final, le nom du sol dans chaque profil. La structure a été appréciée selon la présence ou non d'agrégats et à indiqué sur l'architecture du sol et donc sur le mode d'agencement de ses composants. La caractérisation de la dimension des particules minérales ou texture, s'est faite de façon tactile. Ainsi, lorsque le toucher de l'échantillon humecté est rugueux, on est dans la catégorie des sables. Si le toucher est doux, soyeux, ce sont les limons (diamètre entre 2 et 50  $\mu\text{m}$ ) et, quand le toucher est collant, on parle d'argile (diamètre  $< 2\mu\text{m}$ ). Le volume vide des sols ou porosité, correspondant au volume relatif des vides présents a été déterminé lorsqu'une fine quantité d'eau versée sur une motte de terre, arrive ou non à pénétrer. On parlera de sols poreux lorsque l'eau y pénètre et de non poreux, lorsqu'elle ne traverse pas l'échantillon. La limite entre les couches a été appréciée selon qu'elle est nette, régulière ou diffuse. Quant au drainage interne, elle a été déterminée en fonction des tâches d'oxydation, rouille, de décoloration, d'oxydo-réduction présentes sur les horizons. Ces tâches, étant la marque des signes d'excès d'eau (hydromorphie) ou non. Enfin, le taux des éléments grossiers a été déterminé après deux semaines, au laboratoire. Pour cette appréciation, des échantillons du sol, représentatifs de chaque horizon identifié ont été prélevés, séchés à l'air libre, sous abri, puis pesés. Ensuite, est effectué un tamisage à la maille de 2 mm et, le refus

constituant les éléments grossiers, est pesé. Le rapport du poids du refus sur le poids avant tamisage, indique ainsi, le pourcentage des éléments grossiers.

### Résultats et discussion

#### Séquence des profils ouverts

Les figures 4 et 5 indiquent les profils ouverts respectivement sur le Blafo et le Guéto. Les lettres A, B, C suivies des chiffres représentent la codification des horizons. Les horizons de surface et humifères sont notés A, les horizons argileux et d'accumulation notés B et les horizons proches de la roche mère, notés C.

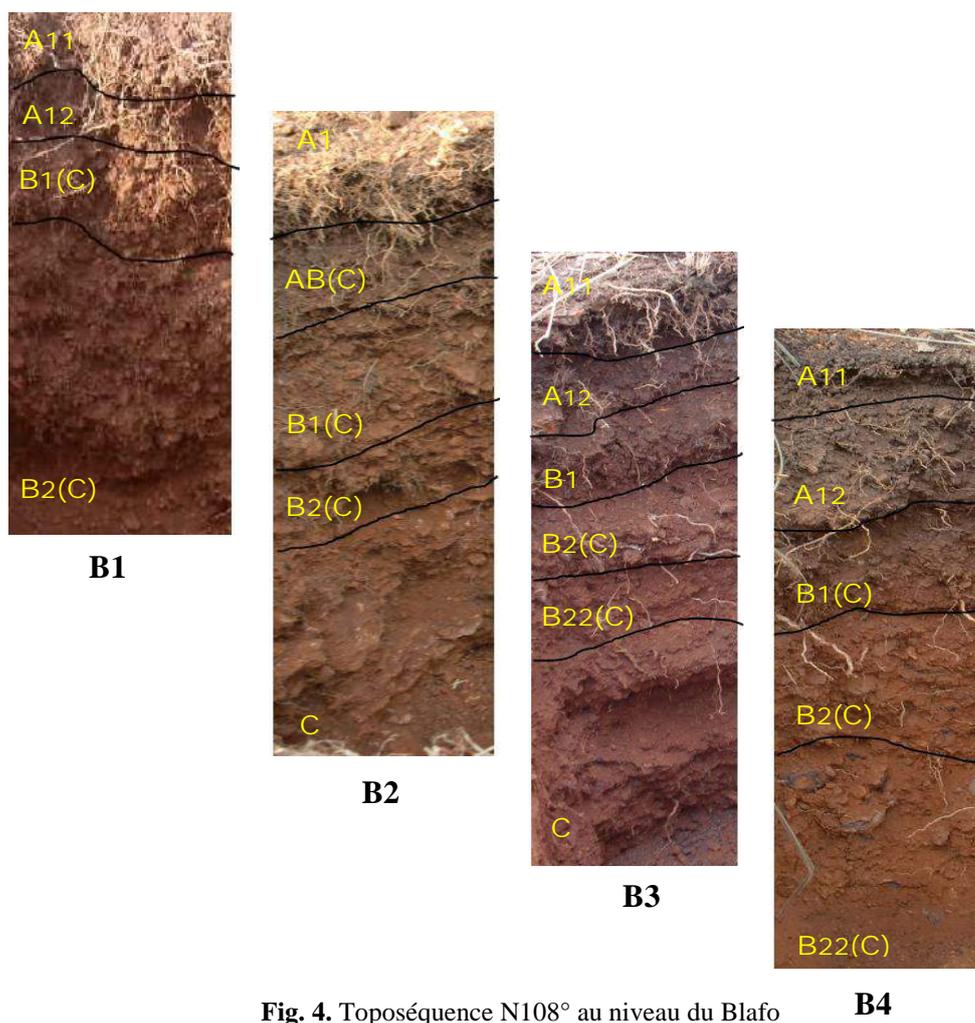
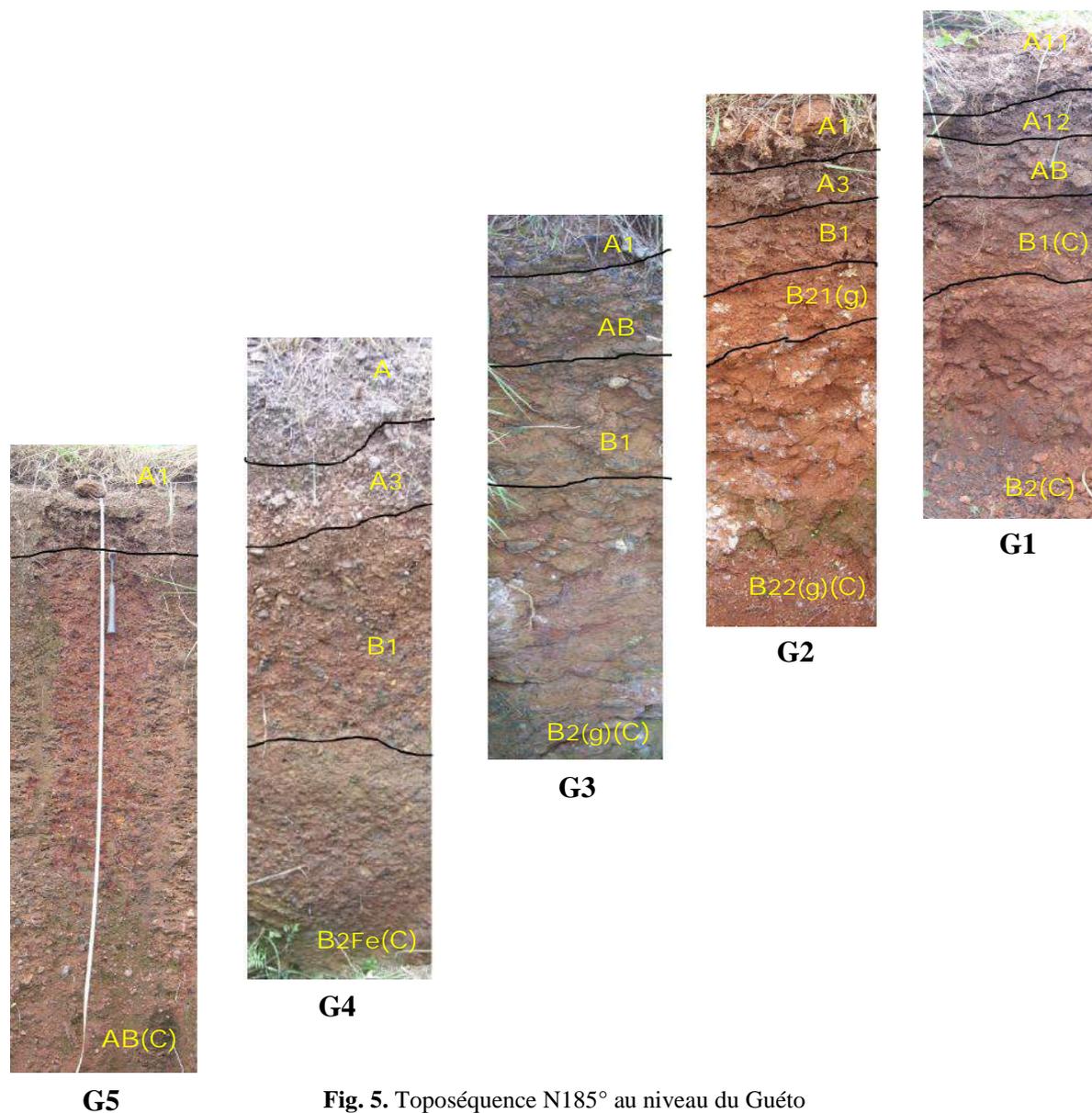


Fig. 4. Toposéquence N108° au niveau du Blafo

**B4**



**Fig. 5.** Toposéquence N185° au niveau du Guéto

Les horizons de sols décrits, sont dans l'ensemble brunifiés, présentant par endroits des indurations cuirassées (B1, G4 et G5). Et, chaque type de sol, classé selon l'indication de la Commission de Pédologie et de Cartographie des sols (CPCS, 1967) a fait, plutard, l'objet d'un classement dans le système "World Reference Base" (WRB) définit par la FAO en 2006. Ainsi, l'équivalent de ses sols brunifiés dans le système WRB, nous indique des cambisols. Le résumé de ces types de sols est consigné dans les tableaux I et II.

**Tableau I.** Sols décrits au Blafo

Profil	Type de classification	
	CPCS (1967)	WRB (2006)
B1	Sol brunifié, remanié, rajeuni à faciès induré	Cambisol pisoplinthique
B2	Sol brunifié, remanié, rajeuni	Cambisol
B3	Sol brunifié, rajeuni à faciès remanié	Cambisol
B4	Sol brunifié, remanié, induré à faciès rajeuni	Cambisol plinthique

**Tableau II.** Sols décrits au Guéto

Profil	Type de classification	
	CPCS (1967)	WRB (2006)
G1	Sol brunifié, remanié à faciès rajeuni	Cambisol
G2	Sol brunifié, rajeuni, remanié	Cambisol
G3	Sol brunifié, rajeuni, remanié	Cambisol
G4	Sol brunifié, remanié à faciès rajeuni et induré en profondeur	Cambisol plinthique
G5	Sol brunifié, remanié à faciès rajeuni et induré	Cambisol plinthique

### Caractères macromorphologiques décrits

Les caractères macromorphologiques des sols qui ont été décrits sont indiqués dans les tableaux III et IV. Différentes codifications ont été utilisées pour des besoins d'insertion dans les tableaux. Ainsi, au niveau :

- ✓ de la couleur : B = Brun ; BA = Bariolée ; BI = Bigarré ; BO = Brun orangé ; BS = Brun sombre ; BR = Brun rouge ; BRT = Brun rouge tachetée ; BRB = Brun rouge bariolée ; BST = Brun sombre tachetée ;
- ✓ de la structure : G = Grumeleuse ; P = Polyédrique ; PS = Polyédrique subanguleux ; PS±G = polyédrique subanguleux à tendance grumeleuse ; PA = polyédrique anguleux ;
- ✓ de la texture : A = Argileux ; AS = Argilo-sableux ; SA = Sablo-argileux ; SLA = Sablo-limono-argileux ; ASL = Argilo-sablo-limoneux ; LSA = Limono-sablo-argileux ;
- ✓ de la cohésion : C = Cohérent ; PC = Peu cohérent ; TC = Très cohérent ;
- ✓ de la porosité : P = Poreux ; PP = Peu poreux ; TP = Très poreux ;
- ✓ de la transition entre les horizons : Pr = Progressive, N = Nette ; D = Diffuse
- ✓ des tâches : OO = Ocre orangée ; OJ = Ocre jaune ; OR = Ocre rouge ; JO = Jaune orangée ; JV = Jaune violacée ; J = Jaune ; BE = Beige ; NO = Noir ; GL = Gley ; VI = Violet.

**Tableau III.** Caractères macromorphologies décrits au Blafo

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Couleur	Struct.	Textur e	Cohésio n	Porosit é	Transitio n horizon	Classe drainag e	% éléments grossiers	Tâches
B1	A11	0 - 5	B	G	SLA	C	TP	Pr	1,8	69,23	-
	A12	5 - 20	BR	G	ASL	PC	TP	Pr	1,6	84,62	-
	B1(C)g	20 - 39	BRT	P	ASL	PC	PP	Pr	2,3	83,33	OO/OJ
	B2(C)	39 - 70	BRB	P	ASL	PC	PP	-	7,5	71,33	OJ/OR
B2	A1	0 - 7	BS	G	ALS	C	P	Pr	1,8	70,00	-
	AB(C)	7 - 20	BRT	PS	ALS	PC	PP	Pr	2,2	83,33	JV
	B1(C)	20 - 50	BRT	PS	ASL	PC	PP	Pr	4,5	80,00	JO/JV
	B2(C)	50 - 60	BRT	PS	ASL	PC	PP	Pr	4,0	78,57	J
	C	60 - 100	BRT	PS	ASL	PC	PP	-	5,5	65,2	JO
B3	A11	0 - 10	BS	PS±G	ALS	C	P	N	1,7	68,14	-
	A12	10 - 22	BR	PS	ALS	PC	P	Pr	1,7	73,54	-
	B1	22 - 35	BR	PS	ALS	PC	P	Pr	1,6	72,25	-
	B2(C)	35 - 55	BRT	PS	ALS	PC	PP	D	3,5	71,33	J
	B22(C)	55 - 70	BRT	PS	A	PC	TP	Pr	6,5	67,85	J
	C	70 - 120	BI	PA	A	PC	TP	-	8,5	66,33	J
B4	A11	0 - 5	S	G	ALS	C	P	Pr	1,6	72,73	-
	A12	5 - 15	BS	P	ASL	PC	P	N	1,6	91,67	-
	B1(C)	15 - 30	BO	PS	AS	C	P	D	2,2	84,62	BE/J
	B2(C)	30 - 50	BR	PS	AS	C	P	D	2,5	81,82	JB/J
	B22(C)	50 - 70	BA	PS	AS	C	TP	-	5,5	79,33	J/NO

Les sols étudiés au Blafo comme au Guéto, sont fortement pourvus en éléments grossiers. Les pourcentages les plus faibles sont autour de 60. Les horizons les plus forts élevés sont ceux d'accumulation, notamment les horizons intermédiaires. Au niveau de la structure, les horizons de surface et humifères sont grumeleux, tandis que les horizons de profondeur sont polyédriques plus ou moins sub-anguleux.

**Tableau IV.** Caractères macromorphologies décrits au Guéto

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Couleur	Struct.	Textur	Cohésio n	Porosit é	Transitio n horizon	Classe drainag e	% éléments grossiers	Tâches
G1	A11	0 - 10	B	PS±G	LSA	PC	TP	Pr	1,6	75,00	-
	A12	10 - 25	BS	PS±G	SA	PC	TP	D	1,6	84,62	-
	AB	25 - 40	BST	PS±G	AS	PC	TP	N	1,8	85,57	OJ/OR
	B1(C)	40 - 65	BRT	PS	AS	C	P	Pr.	2,5	83,33	OR/OJ
	B2(C)	65 - 120	BRT	PS	AS	C	PP	-	3,5	83,33	OR/OJ
G2	A1	0 - 10	BS	PS±G	LSA	PC	TP	Pr	1,6	70,00	-
	A3	10 - 25	BST	PS±G	SA	PC	TP	Pr	1,8	81,82	OJ/BE
	B1	25 - 43	BST	PS±G	AS	PC	TP	N	1,8	81,82	OJ/OV
	B21(g)	43 - 70	BRT	PS	AS	C	P	D	2,5	66,66	GL/BE
	B22(g)(C)	70 - 160	BRT	PS	AS	C	P	-	5,5	66,67	GL/BE
G3	A1	0 - 20	BS	PS±G	LSA	C	TP	Pr	1,6	66,67	-
	AB	20 - 60	BS	PS±G	AS	C	TP	Pr	1,6	76,92	-
	B1	60 - 100	BRT	PS	AS	TC	P	Pr	1,8	63,64	VI/OR
	B2(g)(C)	100 - 200	BRT	PS	AS	TC	P	-	4,5	72,73	VI/GL/OR
G4	A1	0 - 15	BS	PS±G	LSA	C	P	D	1,6	63,63	-
	A3	15 - 47	BR	PS	SA	C	P	Pr	1,8	80,00	-
	B1	47 - 100	BRT	PS	AS	C	PP	Pr	4,5	76,92	OJ/NO
	B2FeC	100 - 140				Horizon induré				78,57	-
G5	A1	0 - 15	BS	PS±G	SA	PC	PP	N	1,60	78,57	-
	AB(C)	15 - 200	BRT	PS	AS	TC	PP	-	6,50	83,33	OJ/OV/NO

La texture est plus argileuse, plus ou moins argilo-sableuse dans les horizons intermédiaires ou de profondeur et sablo-argileux dans les horizons de surface. En surface, les horizons sont peu cohérents et très poreux. En revanche, ils sont cohérents à très cohérents en surface et peu poreux en profondeur. Les transitions entre les couches sont dans l'ensemble progressives entre les trois premières couches des profils et diffuses en profondeur. Le drainage est, dans l'ensemble, bon dans les deux premiers horizons car variant entre 1 et 2, moyen dans les horizons de profondeur (2 à 4). Au-delà de 5, le drainage est très mauvais et concerne les horizons notés C. Les taches d'oxydations, preuves d'un drainage moyen ou mauvais partent de l'ocre, du violacé, du jaune au gley.

### **Discussion**

Sur la base des caractères macromorphologiques décrits, l'ensemble des profils ouverts au Blafo comme au Guéto indique des sols bruns selon la classification CPCS. Ainsi, comme processus pédogénétique majeur, on parlera de brunification. La couleur brune des sols étant due à l'association de la teinte noire ou brun-noir de l'humus et de la teinte rouge ou orangée des composés du fer.

En plus d'être brunifiés, les sols développés sur la portion volcano-sédimentaire birrimien du *Blafo-Guéto* sont riches en éléments grossiers, rajeunis et indurés par endroits. On admet alors, comme l'a souligné Yao-Kouamé (2007a et 2007b) à l'issue de ses travaux à Anikro et à Kahankro (Toumodi) portant sur la portion volcano-sédimentaire de cette partie de la région Centre-Sud de la Côte d'Ivoire, que le remaniement et le rajeunissement accompagnent ce processus de brunification.

Le remaniement fait allusion aux taux des éléments grossiers, qui sont d'ailleurs très abondants dans les sols décrits au *Blafo-Guéto*, dépassant les 60%. Et, ils sont plus abondant dans les horizons intermédiaires, d'accumulations à texture argilo-sableuse. La présence significative de ces éléments grossiers, composés essentiellement de concrétions ou nodules ferrugineuses et de quartz peuvent constituer un obstacle majeur au développement racinaire et, en revanche, maintenir la porosité du sol et la protection contre le tassement. Cette grande porosité qu'ils occasionnent devrait contribuer à réduire considérablement l'eau dans le sol, mais, la nature de ces éléments grossiers (concrétions et nodules ferrugineuses) pourrait permettre à l'eau de s'y imbibée et être restituée aux plantes. Ceci a été signalé par Boa (1989) dans ses travaux sur la caractérisation des contraintes agronomiques des sols gravillonnaires de Booro-Borotou à Touba au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire.

Les structures décrites au Blafo-Guéto, sont dans l'ensemble grumeleuses dans les horizons humifères ou les premiers horizons de chaque profil et polyédriques subanguleuses

dans les autres horizons. Ceci dénote du fonctionnement du sol et, l'étude structurale des couches de sol, nous renseigne sur beaucoup de paramètres. En effet, un sol bien structuré s'apparente à la structure grumeleuse dont les avantages vont d'une bonne rétention de l'eau et des éléments nutritifs, d'un bon drainage, d'une bonne aération, d'un bon développement du système racinaire des végétaux à une bonne résistance à l'érosion. Cette structuration grumeleuse, très bonne, est d'origine biologique et racinaire, différente de la structure polyédrique subanguleuse. La structuration polyédrique subanguleuse se fait par la fissuration des argiles et des limons et comme, l'indiquent Baize et Jabiol (1995), elle est d'une bonne qualité agronomique, mais moins bonne, comparée à la structure grumeleuse. Ainsi, la corrélation est bien faite, dans le cas des sols décrits au Blafo et au Guéto, où nous apprécions parfaitement le lien entre bonne porosité, bon drainage, manque de tâches d'hydromorphie et structure grumeleuse. Par contre, les tâches sont observées à partir des horizons à structure polyédrique subanguleuse, témoignant de la présence temporaire d'un engorgement en eau et où les limites entre les couches sont nettes ou progressives. Ces tâches ici, étant différentes des couleurs hétérogènes due à l'altération des minéraux, tel que souligné par Yoro en 2002.

### **Conclusion**

Les conditions actuelles des sols décrits sur les collines Blafo et Guéto, indiquent des sols brunifiés, pourvus en un fort taux d'éléments grossiers. L'appréciation de quelques caractères macromorphologiques de ces sols développés sur la portion volcano-sédimentaire, au travers de deux toposéquences ressort une très bonne structuration des horizons humifères allant jusqu'à 30 à 40 cm. Au-delà de cette profondeur, les structures sont moins bonnes et présentant par endroit des conditions d'hydromorphie temporaire. La contrainte majeure de ces sols, pourrait être ainsi, le fort taux élevé des éléments grossiers.

### **Références:**

- Baize D. et Jabiol B., 1995. Guide pour la description des sols. *Collection techniques et pratiques*, INRA, Paris, 375 p.
- Bech J., Roca N., Barceló J., Duran P., Tume P. and Poschenrieder C., 2012. Soil and plant contamination by lead mining in Bellmunt, Western Mediterranean Area. *J. Geochem. Explor.* 113, 94–99.
- Boa D., 1989. Caractérisation, propriétés hydrodynamiques, contraintes et potentialités agronomiques des sols gravillonnaires : cas de Booro-Borotou (région de Touba, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Thèse Doc-Ing.*, Université d'Abidjan, 126 p.

- Bouabdli A., Saïdi N., El Founti L. et Leblanc M., 2004. Impact de la mine d'Aouli sur les eaux et les sédiments de l'oued Moulouya (Maroc). *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, 140, 27-33.
- 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". *Cah.ORSTOM., ser. Pedol.*, vol.XIX, n°4, 1982 : 309-321.
- CPCS, 1967. Classification des sols. *Travaux CPCS 1963-1967*, 100 p.
- FAO, 2006. World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. *World soil resources reports*, 103, 145p.
- Gómez-Álvarez A., Valenzuela-García J. L., Meza-Figueroa D., O-Villanueva M., Ramírez-Hernández J., Almendariz-Tapia J. y Pérez-Segura E., 2012. Impact of mining activities on sediments in a semi-arid environment: San Pedro River, Sonora, Mexico. *Appl. Geochem.* 26, 2101–2112.
- Grandin G., 1976. Aplanissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'ouest". *Mém. ORSTOM* 82, 275 p.
- Grandin G. et Perseil E. A., 1983. Les Minéralisations Manganésifères Volcano-sédimentaires du Blafo-Guétó (Côte d'Ivoire) - Paragenèses - Altération Climatique. *Mineral. Deposita* 18, 99-111.
- Leblond P., 1984. Contribution aux études hydrogéologiques en Côte d'Ivoire. Région de Yamoussoukro (Station expérimentale de l'ENSTP). *Thèse de 3è cycle de l'Université de Bordeaux I*, France, n° d'ordre 2015, 150 p.
- Qiu G., Feng X., Meng B., Sommar J. and Gu C., 2012. Environmental geochemistry of an active Hg mine in Xunyang, Shaanxi Province, China. *Appl. Geochem*, 27, 2280–2288.
- Ruhe R. V. et Walker P. H., 1968. Hillslope models and soil formation: 1. Open systems. *Trans. Int. Cong. Soil Sci.* 9th, 4 : 551-560.
- Saidi N., Brhada F., Zaïd A., Bouabdli A. et Escarré J., 2002. Impact de la mine d'Aouli sur l'écosystème au niveau de la Haute Moulouya (Maroc). *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, 138, 21-27.
- Salinas Villafane O. R., Igarashi T., Kurosawa M. and Takase T., 2012. Comparison of potentially toxic metals leaching from weathered rocks at a closed mine site between laboratory columns and field observation. *Applied Geochemistry*, 27 (2012) 2271–2279.
- Sonnendrucker P., 1968. Etude de synthèse sur l'or de Côte d'Ivoire. Les régions aurifères dispersées. *Rap. SODEMI*. n°220, 97 p.

Yao-Kouamé A., 2007a. Nature des éléments grossiers observés dans les sols brunifiés dérivés de matériaux du complexe volcano-sédimentaire de Toumodi - Kanhankro en moyenne Côte d'Ivoire. *Rev. CAMES- Série A*, Vol. 05, pp 39-52.

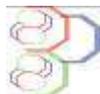
Yao-Kouamé A., 2007b. Caractéristiques physiques des sols brunifiés dérivés des formations du complexe volcano-sédimentaire de Kanhankro (Toumodi) en moyenne Côte d'Ivoire. *Rev. CAMES- Série A*, Vol. 05, pp 76-86.

Yoro G., 2002. La pédologie pour une gestion durable des sols. Cours d'initiation pour les agents des caisses de stabilisation et de péréquation du Gabon. *Document interne du CNRA*, Abidjan, 24 p.

Zanone L., 1964. Le manganèse de Côte d'Ivoire. *Rapport multigr. SODEMI*. no.44 et 44 bis, 273 p.

## **1<sup>ère</sup> PUBLICATION HORS THÈSE**

**1-** 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



## Attributs physico-chimiques et contrainte à la productivité agricole des sols du site manganésifère de Lauzoua (Guitry) en Côte d'Ivoire

<sup>1</sup>Nangah K. Y., <sup>2</sup>Yao-Kouamé A., <sup>2</sup>Yao G. F., <sup>2</sup>Kouakou Y. K. N., <sup>2</sup>Alui K. A. et <sup>1</sup>Savane I.

<sup>1</sup> Laboratoire Géoscience et Environnement, UFR Science et Gestion de l'Environnement, Université d'Abobo-Adjamé, 01 BP 802 Abidjan 01 Côte d'Ivoire

<sup>2</sup> Département de pédologie, UFR Science de la Terre et de Ressources Minières, Université de Cocody, 06 BP 688 Abidjan 06

\*Auteur pour les correspondances : (225) 06188541 [nangahk@yahoo.fr](mailto:nangahk@yahoo.fr) [Krogba@gmail.com](mailto:Krogba@gmail.com)

Originally Submitted on 10<sup>th</sup> October 2011. Published online at [www.m.elewa.org](http://www.m.elewa.org) on February 27, 2012.

### RESUME

*Objectif* : Les sols de la région de Guitry issu de matériaux volcano-sédimentaire ont fait l'objet de cette étude pour leur occurrence en manganèse. Cette étude a été conduite dans un souci de réalisation de l'état des potentialités des sols manganésifère de Côte d' Ivoire avant de les soumettre à exploitation.

*Méthodologie et résultat* : Deux toposéquences ont été implantées et les fosses pédologiques sont disposées en fonction des segments topographiques. Au total, 34 échantillons de sols ont été convoyés au laboratoire pour les analyses courantes de pédologie. Les résultats obtenus montrent que les sols sont à dominance limoneuse avec des pH inférieur à 5,5. La matière organique et les cations en bases sont faibles. Les faibles teneurs en matière organique, les faibles valeurs de pH et de bases échangeables pourraient constituer des risques essentiels à une bonne productivité agricole.

*Conclusion et application* : Il serait profitable pour ces sols d'adopter des techniques agricoles permettant de rehausser le pH. Cela contribuerait à la libération de certains éléments chimiques tout en jouant un rôle bénéfique sur les rendements. Le chaulage devra donc être appliqué pour ces sols en vue d'améliorer les rendements.

**Mots clés** : Fertilité, Sol manganésifère, CEC, pH, Matière organique.

### ABSTRACT

*Objective*: The soils of Guitry which are from volcano-sedimentary materials were the subject of this study for their occurrence in manganese. This study was conducted with a view to achieving the potential status of manganiferous soil of Ivory Coast before submitting for exploitation.

*Methodology and results*: Two toposequences were implemented and the soil pits were arranged based on the topographic segments. Thirty four (34) soil samples were taken to the laboratory for routine soil science analysis. The results showed that the soils were predominantly loam with a pH below 5.5. Organic matter and cations were low in bases. The low organic matter content, low pH and exchangeable bases may pose a risk to good agricultural productivity.

*Conclusion and application*: It would be beneficial for these soils to adopt farming techniques that raise the pH. This would contribute to the release of certain chemicals while playing a beneficial role on productivity.

**Keywords**: Fertility, manganiferous Soil, CEC, pH, organic matter.

## INTRODUCTION

En région tropicale humide, la mise en valeur des terres rencontre des difficultés liées souvent à l'inadéquation des pratiques utilisées, par rapport aux caractéristiques des sols (Mbonigaba *et al.*, 2009). Dans de nombreux cas, le non prise en compte des contraintes physiques et chimiques est préjudiciable à l'exploitation de ceux-ci. Pourtant, il est connu depuis très longtemps, que certains paramètres du sol jouent un rôle capital dans la gestion de la nutrition végétale et qu'un approvisionnement adéquat en éléments nutritifs dépend de leur optimisation (Troeh et Thompson, 2005). Par ailleurs, la connaissance des facteurs limitant constitue un préalable important dans la recherche d'une production agricole efficiente tant sur les plans agronomique, économique qu'environnementale. Cette dernière recommande une utilisation et une gestion des sols basées sur des diagnostics fiables (Dahnke et Olson, 1990 ; Parent et Dafir, 1992). C'est dans cette optique que les travaux ont été menés sur les sols de Guitry. En effet, les sols de cette zone sont issus de matériaux volcaniques et sont des sites d'extraction de manganèse. Or, les travaux d'Edou-Minko (2003), réalisés sur les sols du

plateau manganésifère d'Okouma en zone équatoriale ont mis en évidence une acidité et une pauvreté en ions basiques dans ces sols, tandis que très peu d'informations sont aujourd'hui disponibles sur les indicateurs chimiques et physiques s'agissant des sols issus des zones manganésifères de Côte d'Ivoire, en particulier ceux de Lauzoua, à Guitry.

Ce travail s'inscrit donc dans un programme de recherche qui vise à faire l'état des potentialités des sols des sites manganésifères de Côte d'Ivoire, avant de les soumettre à l'exploitation de plus en plus grandissante du manganèse en vue de conseiller les populations rurales sur les types de mise en valeur agricoles auxquelles ils peuvent s'adonner, à la fermeture du chantier minier. Il s'agit plus spécifiquement de :

- évaluer les caractéristiques physiques et chimiques actuelles des sols manganésifères de Lauzoua (Guitry) ;
- relever les principales contraintes à la production de ces sols ;
- formuler les recommandations relatives à leur amélioration et exploitation durable.

## MATERIEL ET METHODES

**Zone d'étude :** L'étude a été réalisée dans le département de Guitry, au Sud de la Côte d'Ivoire. La zone est située au niveau de l'ex-mine de « Mokta » de coordonnées 05°23'00.9"Ouest et 05°20'06.5"Nord, sous un climat de type équatorial (sous climat attéen), avec une pluviométrie variant entre 1400 à 2500 mm/an. Ce climat se singularise par une température moyenne annuelle de 25 à 33°C, avec un taux d'humidité de 80 à 90%. La végétation est de type forêt dense humide sempervirente. Les sols de cette zone sont issues de l'altération de matériaux volcano-sédimentaire constitués essentiellement de tufs, de quartzites, des métaarénites, des ampélites, des ampélites manganésifères (gondites), de métarhyolites.

**Echantillonnage des sols et codification des horizons :** Deux toposéquences ont été étudiées selon la méthode de Boulet *et al.* (1982). Les fosses, réalisées exclusivement sous végétation naturelle, sont réparties par position topographique (Haut de versant, Moyen versant et Bas de versant). Au total, 34 horizons

ont été décrits dans ces fosses, en tenant compte des caractères d'hétérogénéité dans le solum (couleur, caractères physiques et morphologiques). Les horizons, d'épaisseur différente, qui ont été identifiés dans les solums ont été codifiés par la suite en créant des classes de profondeur, notées P1 (0-20 cm), P2 (20-60 cm), P3 (60-80 cm) et P4 (80-120 cm). La profondeur attribuée à ces codes répond aux critères d'épaisseur de l'horizon organique (0-20 cm) des sols tel que décrit par Diatta (1996), ainsi qu'à ceux des profils racinaires des cultures vivrières, à savoir : 0-60 cm pour les cultures vivrières à enracinement moyennement profond, 0-80 cm pour celles à enracinement profond ou très profond (0-150 cm), selon les travaux de Böhm (1976). Ainsi, chaque horizon est inclus dans une tranche de profondeur (P1, P2, P3 et P4) correspondant à son code.

**Analyses physico-chimiques :** L'analyse granulométrique a été effectuée par la méthode densimétrique, à l'aide de la pipette de Robinson (Gee

et Bauder, 1986). Cinq classes granulométriques ont été séparées : argiles (0-2 µm) ; limons fins (2-20 µm) ; limons grossiers (20-50 µm) ; sables fins (50-200 µm) ; sables grossiers (200-2000 µm). Les mesures de pH ont été effectuées par électrométrie, dans une suspension de sol dans l'eau, pour le pH-H<sub>2</sub>O, et dans une solution normale de chlorure de potassium (KCl), pour le pH-KCl, selon un rapport sol-solvant de 1 / 2,5 (Thomas, 1996). Le carbone organique (Corg) a été dosé selon la méthode de Walkley et Black (1934), le résultat a été converti en matière organique (MO) du sol en utilisant le facteur 1,724 (MO = Corg x 1,724). Quant à l'azote total, il a été déterminé par la méthode Kjeldahl (Bremner, 1996). Les bases échangeables et la capacité d'échange cationique ont été dosées dans une solution d'extraction à l'acétate d'ammonium

(CH<sub>3</sub>COOH 1N) tamponnée à pH 7 (Thomas, 1982). Le Phosphore assimilable a été déterminé par la méthode Olsen modifié Dabin. Quant au phosphore total, il a été déterminé par colorimétrie, après extraction à l'acide perchlorique (Olsen et Sommers, 1982).

**Analyses Statistiques :** Les données ont été traitées statistiquement à l'aide du logiciel Statistica 7.1. L'analyse de variance (ANOVA) avec le PPDS (Plus Petite Différence Significative) a été appliquée aux données pour tester les différences entre les propriétés de sols le long des niveaux (segments) topographiques. Les relations linéaires des coefficients ont été établies en utilisant le test de corrélation de Pearson à 5%, 1% et 0,1% de significativité (Pimentel Gomez et Garcia, 2002).

## RESULTATS ET DISCUSSION

**Granulométrie :** Le limon est de façon générale, la fraction granulométrique la plus représentative sur le site d'étude dans la couche arable mais, les teneurs en argile sont plus fournies au niveau du bas de versant (tableau 1). Cela pourrait s'expliquer par les phénomènes d'entraînement et de lessivage favorisé par la position topographique. Dans ces sols, le sable

reste la fraction la moins représenté. Selon les limites des classes granulométriques les sols étudiés entrent dans la classe de textures équilibrées (Shein, 2009). Il n'y a pas de différence significative entre les différentes teneurs des niveaux topographiques, les légères variations sont attribuées à la variabilité spatiale des sols ainsi qu'à la variation topographique.

**Tableau 1 :** Composition granulométrique suivant les limites des tailles des particules d'argile, de limon et de sable des sols en fonction du niveau topographique et de la profondeur

Niveau de versant	Horizon	Argile (%) M ± ES	Limon(%) M ± ES	Sable(%) M ± ES	Texture
Haut versant	P <sub>1</sub>	20 ± 6	48 ± 2	32 ± 5	Limoneux (Loam)
	P <sub>2</sub>	16 ± 1	60 ± 10	24 ± 9	Limoneux fin (Silt loam)
	P <sub>3</sub>	16 ± 1	62 ± 13	22 ± 11	Limoneux fin (Silt loam)
	P <sub>4</sub>	36 ± 11	45 ± 12	19 ± 3	Limono-argileux fin (Silty clay loam )
Moyen versant	P <sub>1</sub>	25 ± 2	53 ± 2	22 ± 1	Limoneux fin (Silt loam)
	P <sub>2</sub>	35 ± 1	45 ± 3	20 ± 2	Limono-argileux (Clay loam)
	P <sub>3</sub>	28 ± 8	47 ± 5	25 ± 2	Limono-argileux (Clay loam)
	P <sub>4</sub>	28 ± 8	47 ± 5	25 ± 2	Limono-argileux (Clay loam)
Bas versant	P <sub>1</sub>	28 ± 8	46 ± 7	26 ± 4	Limono-argileux (Clay loam)
	P <sub>2</sub>	45 ± 7	38 ± 8	17 ± 1	Argileux (Clay)
	P <sub>3</sub>	44 ± 11	39 ± 15	17 ± 3	Argileux (Clay)
	P <sub>4</sub>	44 ± 15	29 ± 6	27 ± 8	Argileux (Clay)

**Complexe adsorbant des sols de Lauzoua (Guitry) :**

Les valeurs de  $\text{Ca}^{2+}$  dans les sols du site manganésifère de Lauzoua (Grand-Lahou) sont comprises entre 0,89 et 2,44  $\text{cmol.Kg}^{-1}$  (tableau 2) et considérées comme de faibles concentrations (Landon, 1991). Selon cet auteur, les déficiences en calcium échangeable dans les sols surviennent normalement dans les sols de faibles CEC, à  $\text{pH} \leq 5,5$  ; ce qui est le cas pour le site d'étude. Les valeurs obtenues pour le Mg varient entre 4,3 et 0,7  $\text{cmol.Kg}^{-1}$  (tableau 2). Ces valeurs de Mg sont pour la plupart nettement supérieures à 0,5  $\text{cmol.Kg}^{-1}$ , seuil de déficience en magnésium dans les régions tropicales (Mbonigaba, 2009).

Les teneurs en  $\text{K}^+$  oxillent entre 0,08 et 0.64  $\text{cmol.Kg}^{-1}$  (tableau 2). Les valeurs acceptables s'observent dans les deux premiers horizons des sols. Ce fait est favorable pour l'agriculture, car selon Romheld et Kirkby (2010), la plupart du potassium disponible pour les plantes est généralement situé dans la couche arable. Ces taux élevés de Mg, et moyen de K, pourrait résulter de la présence de quantité raisonnable de magnésium et de potassium provenant de l'altération de minéraux primaire porteurs de K et Mg tels la biotite ( $(\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2)$ ) et la muscovite ( $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ) ; le mica, l'orthose et le microcline ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) (Mustapha, 2007) ; le chlorite et le feldspath (Marques *et al.*, 2002). D'autres auteurs tels Lucas *et al.* (1993) attribuent cela aux retombées des feuilles en forêt, qui contribuent à recycler les cations et la silice dans la partie supérieure du sol. Il en résulte un taux de saturation élevé dans les premiers centimètres du sol.

Le taux de saturation en bases est élevé dans les horizons de surfaces. Cela résulterait des processus décrit par Lucas *et al.* (1993). Au niveau de la Capacité d'Echange Cationique, il a été observé une différence nettement significative entre les valeurs des différents niveaux topographiques. Les teneurs de Capacité d'Echange Cationique sont modérées au niveau du moyen versant (13,90 à 15,16  $\text{cmol.Kg}^{-1}$ ), mais faibles sur les autres segments topographiques : entre 3,68 et 6,92  $\text{cmol.Kg}^{-1}$  pour le haut de versant, et entre 2,77 et 7,64  $\text{cmol.Kg}^{-1}$  pour le bas versant (tableau 2). Ces teneurs acceptables du moyen versant pourraient résulter de la présence d'argile de haute activité, vu

que les teneurs en carbone organique sont faibles (Mustapha, 2007)

**pH, matière organique et phosphore des sols de Lauzoua (Guitry) :** Les résultats du pH (tableau 3) montrent que les sols de la zone d'étude sont acides, avec des valeurs oxillant entre 5,68 et 4,55. La majorité des sols ont un pH inférieur à 5,5. D'après Brady et Weil (2002), il existe très peu de réactions chimiques et microbiologiques dans des sols qui ne soient pas sensibles au pH. A de faibles valeurs de pH, se produit dans le sol de nombreux phénomènes néfastes à la croissance végétale, telle la diminution de la nitrification, la déficience en phosphore, les toxicités aluminique et manganique, la faible mobilité des polluants organiques et la grande disponibilité de certains métaux lourds (Landon, 1991). Comme indiqué au tableau 3, les moyennes respectives des teneurs en carbone organique et en azote total, exprimée en  $\text{g.kg}^{-1}$  de sol, sont inférieures à 5g de Carbone et à 0,5g d'azote dans les sols, quoique, les valeurs de l'horizon 0-20 cm sont plus fortes. Les valeurs de carbone organique induisent des teneurs en matière organique relativement faibles. Cette matière organique, en raison de sa faible teneur dans les sols étudiés, est peu impliquée dans les processus d'échange cationique qui restent surtout régis par la fraction minérale. Aussi, cette situation devrait-elle se répercuter négativement sur la structure des sols, qui serait essentiellement édifiée grâce aux colloïdes minéraux, et dont la stabilité est probablement imparfaite ; ce qui pourrait générer de nombreuses déficiences de production et défavoriser la résistance aux facteurs de dégradation (Ben Hassine *et al.*, 2008). L'azote total à des teneurs oxillants entre 0,04 et 0,20  $\text{g.kg}^{-1}$  (Tableau 3). Les horizons superficiels (0-20 cm) ont des teneurs approximativement égales ou supérieures à 0,13. Landon (1991) considère les teneurs supérieures ou égales à 0,13 comme satisfaisantes dans les sols tropicaux. Le rapport carbone/azote dans les sols étudiés est moyen à faible dans les couches de sol, à l'exception de l'horizon (0-20 cm) du haut de versant, dont la valeur atteint 21,5 (tableau 3). Selon Genot *et al.* (2009), ce rapport est un indicateur de la qualité de la matière organique dans les sols.

**Tableau 2 :** Complexe adsorbant des sols de Lauzoua (Guitry)

		CEC M ± ES (cmol.kg <sup>-1</sup> )	Ca <sup>2+</sup> M ± ES	Mg <sup>2+</sup> M ± ES	Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> M ± ES	K <sup>+</sup> M ± ES	S M ± ES	V M ± ES
Haut de versant	P1	3.68 ± 0.99a	1.81 ± 1.64	1.40 ± 0.94	3.21 ± 2.15	0.14 ± 0.06	3.35 ± 2.21	83.36 ± 44.36
	P2	4.16 ± 3.17a	1.58 ± 2.15	0.80 ± 0.95	2.38 ± 3.10	0.10 ± 0.10	2.48 ± 3.20	42.76 ± 44.27
	P3	4.20 ± 3.11a	1.56 ± 2.18	0.78 ± 0.98	2.34 ± 3.16	0.10 ± 0.11	2.43 ± 3.27	40.03 ± 48.13
	P4	6.92 ± 7.54a	1.30 ± 0.72	0.83 ± 0.57	2.13 ± 1.27	0.18 ± 0.24	2.31 ± 1.40	54.60 ± 58.32
Moyen versant	P1	15.16 ± 4.52b	2.45 ± 0.85	2.13 ± 1.27	4.58 ± 2.03	0.19 ± 0.20	4.77 ± 1.95	36.66 ± 25.05
	P2	14.70 ± 6.93b	1.63 ± 1.29	4.33 ± 4.47	5.96 ± 5.76	0.64 ± 0.82	6.60 ± 6.58	38.60 ± 26.60
	P3	13.90 ± 5.80b	1.23 ± 0.74	1.04 ± 0.18	2.27 ± 0.55	0.30 ± 0.33	2.57 ± 0.88	18.76 ± 1.47
	P4	13.90 ± 5.80b	1.23 ± 0.74	1.04 ± 0.18	2.27 ± 0.55	0.30 ± 0.33	2.57 ± 0.88	18.76 ± 1.47
Bas de versant	P1	7.63 ± 4.95a	2.32 ± 1.61	2.57 ± 1.65	4.88 ± 2.93	0.22 ± 0.11	5.10 ± 2.97	88.10 ± 76.73
	P2	5.97 ± 6.61a	1.03 ± 1.02	1.65 ± 2.02	2.68 ± 3.04	0.10 ± 0.05	2.78 ± 2.99	47.82 ± 2.88
	P3	8.16 ± 7.7a	1.37 ± 1.20	2.18 ± 2.55	3.55 ± 3.74	0.08 ± 0.04	3.63 ± 3.70	41.51 ± 6.19
	P4	2.77 ± 0.4a	0.89 ± 0.80	0.74 ± 0.60	1.63 ± 1.39	0.12 ± 0.01	1.75 ± 1.39	68.31 ± 62.26

M ± ES : Moyenne ± Erreur Standard (n=34). Les valeurs suivies de la même lettre dans la colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon Fisher

**Tableau 3 :** pH, matière organique et phosphore des sols de Lauzoua (Guitry)

		pH eau M±ES	pH kcl M±ES	C M±ES	OM M±ES g.kg <sup>-1</sup>	N M±ES	C/N M±ES	P total M±ES	P ass. M±ES mg.kg <sup>-1</sup>
Haut de versant	P1	5.46 ± 0.26	4.63 ± 0.16	1.86 ± 0.66	3.20 ± 1.14	0.13 ± 0.07	21.53 ± 11.78	264.00 ± 43.24a	21.66 ± 6.12
	P2	4.85 ± 0.25	4.00 ± 0	0.74 ± 0.55	1.28 ± 0.95	0.11 ± 0.09	08.00 ± 1.50	389.50 ± 185.5ac	32.00 ± 22.00
	P3	4.90 ± 0.30	4.00 ± 0	0.73 ± 0.57	1.26 ± 0.98	0.11 ± 0.09	07.25 ± 0.75	252.00 ± 48.00a	20.00 ± 10.00
	P4	4.55 ± 0.17	4.05 ± 0.20	0.42 ± 0.14	0.72 ± 0.25	0.07 ± 0.02	06.21 ± 1.80	176.50 ± 13.78b	8.00 ± 2.74
Moyen versant	P1	5.68 ± 0.27	5.04 ± 0.26	1.78 ± 0.41	3.07 ± 0.71	0.16 ± 0.05	12.87 ± 2.57	480.40 ± 117.86a	51.40 ± 32.35
	P2	4.80 ± 0.60	4.40 ± 0.60	0.90 ± 0.70	1.55 ± 1.20	0.16 ± 0.12	05.35 ± 0.35	328.50 ± 36.50c	20.00 ± 11.00
	P3	5.05 ± 0.85	4.35 ± 0.55	0.35 ± 0.15	0.60 ± 0.26	0.08 ± 0.05	04.42 ± 0.58	248.00 ± 44.00c	24.00 ± 7.00
	P4	5.05 ± 0.85	4.35 ± 0.55	0.35 ± 0.15	0.60 ± 0.26	0.08 ± 0.05	04.42 ± 0.58	248.00 ± 44.00c	24.00 ± 7.00
Bas de versant	P1	5.45 ± 0.28	4.53 ± 0.15	2.00 ± 0.46	3.44 ± 0.80	0.20 ± 0.06	10.63 ± 1.86	690.25 ± 83.38c	44.25 ± 12.93
	P2	5.20 ± 0.17	4.46 ± 0.36	1.00 ± 0.40	1.72 ± 0.69	0.12 ± 0.06	09.58 ± 1.33	459.00 ± 72.43c	33.33 ± 11.89
	P3	5.10 ± 0.40	4.60 ± 0.60	1.10 ± 0.70	1.88 ± 1.21	0.14 ± 0.11	09.96 ± 3.04	428.00 ± 53.00c	23.50 ± 9.50
	P4	5.36 ± 0.52	4.76 ± 0.72	0.47 ± 0.17	0.81 ± 0.29	0.04 ± 0.02	11.50 ± 0.86	278.33 ± 48.38c	20.66 ± 8.25

M ± ES : Moyenne ± Erreur Standard (n=34).,OM (Organic matter), Pas (Phosphore assimilable),Les valeurs suivies de la même lettre dans la colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon Fisher

Les teneurs en phosphore total sont statistiquement différents dans les sols de Guitry (tableau 3). Les valeurs dans les couches de sol, tous niveaux topographiques confondus, sont comprises entre 8 et 51mg/kg de  $P_2O_5$ , les valeurs les plus importantes sont observées dans la première couche (0-20cm) concernant le phosphore assimilable (tableau 3). Selon Mbonigaba *et al.* (2009), les teneurs en phosphore disponible inférieures à 20 mg/kg de  $P_2O_5$  sont considérées comme trop faibles pour assurer une nutrition phosphatée appropriée de la plupart des plantes. La seule valeur jugée faible, dans les sols de Lauzoua, est celle de la dernière couche de sol (80-120 cm) du bas de versant, qui est de 8mg/kg de  $P_2O_5$ . Hormis cette valeur, toutes les couches de sols ont une teneur en phosphore assimilable supérieure ou égale à 20 mg/kg. C'est dire que les sols étudiés ont donc des teneurs relativement acceptables en phosphore assimilable, vu l'importance du phosphore dans le cycle sol-plantes (Kainer *et al.* 2007)

**Relation entre les paramètres physico-chimiques des sols :** Le pH du sol a une relation significative positive avec  $Ca^{2+}$  et le taux de saturation en base (V). Un tel résultat indique que l'augmentation du pH du sol entraîne l'amélioration du  $Ca^{2+}$  contenu et le taux de saturation en bases (tableau 4). Un résultat similaire a été obtenu par Fageria *et al.* (1994), Moreira et Fageria (2009) sur les sols d'Amazonie au Brésil, en zone tropicale.

Le tableau montre une corrélation positive très hautement significative entre la matière organique et

les cations échangeables ( $Ca^{2+}$  (0,72), le  $Mg^{2+}$  (0,66),  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  (0,76)), à exception du potassium avec lequel il n'y a aucune corrélation significative. Des relations positives s'observent également avec le taux de saturation en bases (0,55) et la somme des bases échangeables (0,74). Les corrélations positives observées entre la matière organiques et ces caractéristiques chimiques seraient attribuées à l'influence de ces éléments sur la formation et le maintien de la matière organique (Moreira et Fageria, 2009). Par ailleurs, l'argile et la somme limon+argile ont une relation négative significative avec la matière organique, illustrant ainsi le rôle de protection physique qu'exercent ces fractions granulométriques sur la matière organique (Pallo *et al.*, 2008).

Il n'existe pas de corrélation linéaire significative entre la capacité d'échange cationique et la matière organique (tableau 4). En effet, certains auteurs (Bigorre *et al.*, 2000) ont établi une équation de la capacité d'échange cationique en fonction de l'argile et de la matière organique, et ont insisté sur le caractère additif de ces deux constituants.

D'après le tableau 4, il n'existe pas de corrélation entre le phosphore assimilable et la matière organique, du fait des faibles valeurs de coefficient de corrélation. Ce résultat pourrait induire le fait que le phosphore organique ne soit pas abondant dans ces sols (Ben Hassine, 2008). En revanche, il y a une corrélation positive ( $R=0,65$ ) entre le phosphore assimilable et le phosphore total (tableau 4) au seuil 0,01.

**Tableau 4** : Coefficient de corrélation entre les attributs physico-chimiques des sols du site manganésifère de Lauzoua (Guitry)

Propriétés des sols	pHeau	pHkcl	MO	N	C/N	Ptotal	Pass.	CEC	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	S	V	Argile	Limon	Sable
pHeau	–																
pHkcl	0,84***	–															
MO	0,61***	0,57***	–														
N	0,51**	0,53**	0,73***	–													
C/N	0,24ns	0,11ns	0,44**	-0,23ns	–												
Ptotal	0,22ns	0,10ns	0,45**	0,26ns	0,21ns	–											
Pass.	0,10ns	-0,07ns	0,11ns	-0,03ns	0,12ns	0,65***	–										
CEC	0,12ns	0,30ns	0,16ns	0,32ns	-0,17ns	0,13ns	-0,07ns	–									
Ca <sup>2+</sup>	0,36*	0,51**	0,72***	0,84***	-0,09ns	0,20ns	-0,07ns	0,42*	–								
Mg <sup>2+</sup>	0,34ns	0,54***	0,66***	0,68***	0,03ns	0,23ns	-0,16ns	0,47**	0,61***	–							
Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup>	0,39*	0,59***	0,76***	0,83***	-0,02ns	0,24ns	-0,14ns	0,50**	0,86***	0,93***	–						
K <sup>+</sup>	0,17ns	0,16ns	0,14ns	0,32ns	-0,12ns	0,06ns	-0,16ns	0,57***	0,30ns	0,46**	0,44**	–					
S	0,38*	0,58***	0,74***	0,83***	-0,03ns	0,24ns	-0,14ns	0,53**	0,85***	0,93***	0,99***	0,51**	–				
V	0,36*	0,27ns	0,55***	0,50**	0,15ns	0,10ns	-0,03ns	-0,35*	0,44**	0,27ns	0,38*	0,01ns	0,36*	–			
Argile	-0,38*	-0,35*	-0,41*	-0,35*	-0,12ns	-0,08ns	-0,04ns	-0,07ns	-0,43*	-0,19ns	-0,33ns	0,01ns	-0,31ns	-0,3ns	–		
Limon	0,31ns	0,29ns	0,23ns	0,20ns	0,06ns	0,10ns	0,03ns	0,11ns	0,18ns	0,16ns	0,19ns	-0,07ns	0,18ns	-0,03ns	0,86**	–	
Sable	0,32ns	0,23ns	0,28ns	0,26ns	0,15ns	-0,11ns	-0,05ns	-0,20ns	0,35*	-0,07ns	0,12ns	0,04ns	0,12ns	0,69***	-0,39*	0,06ns	–
Argile+Limon	-0,19ns	-0,17ns	-0,38*	-0,32ns	-0,13ns	0,02ns	-0,02ns	0,06ns	-0,53***	-0,08ns	-0,30ns	-0,11ns	-0,30ns	-0,73***	0,41*	0,11ns	-0,87***

## CONCLUSION ET APPLICATION

Dans les sols tropicaux développés sur matériaux volcano-sédimentaire à forte concentration en manganèse, comme ceux de Lauzoua à Guitry (Côte d'Ivoire), la mise en culture exige une gestion adaptée. Il apparaît d'abord que les faibles valeurs de pH apparaissent constituer la principale contrainte chimique limitant la production agricole. Du point de vue des cations basiques, il est à observer dans ces sols, une déficience en calcium et en potassium.

Par contre, le magnésium est mieux représenté. Par ailleurs, le moyen versant est la partie la mieux pourvue en bases échangeables par rapport aux autres segments topographiques. Les valeurs de la capacité d'échange cationique sont moyennes au moyen versant, mais faibles sur les autres segments

topographiques. Du point de vue de la saturation en bases et de la disponibilité du phosphore, cette zone présente de meilleures conditions nutritionnelles. Cependant, les faibles stocks en carbone organiques et la mauvaise qualité de matière organique, les faibles niveaux de pH et le déséquilibre cationique pourraient constituer des contraintes sévères à la production si des itinéraires techniques appropriés ne sont pas adoptés, tel le rehaussement du pH qui créerait de meilleures conditions favorables à la libération des autres éléments chimiques. Le chaulage devra donc être adopté pour ces sols en vue de leurs permettre une bonne libération des éléments et améliorer les rendements.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ben Hassine H, Aloui T, Gallali T, Bouzid T, El Amri S, 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), 2008 : 4-17.
- Bigorre F, Tessier D, Pédro G., 2000. Contribution des argiles et des matières organiques à la rétention de l'eau dans les sols. Signification et rôle fondamentale de la capacité d'échange en cations. *Géosciences*, C. R. Acad. Sci. Paris, 330 : 245-250.
- Boulet R, Chauvel A, Humbel F-X, 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. *Cah.ORSTOM.*, ser.Pedol., vol.XIX, n°4, 1982 : 309-321.
- Böhm W., 1976. In situ estimation of root length at natural soil profiles. *J. Agric. Sci.* 87: 365- 368.
- Brady NC. and Weil RR, 2002. The nature and properties of soil. 13<sup>th</sup> ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education Inc, 960 p.
- Bremner JM, 1996. Nitrogen-total. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods Part 3*. Soil Science Society of America Inc, American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA: 1085-1122.
- Dahnke W C. et Olson R A, 1990. Soil test correlation, calibration and recommendation. In R. L. Westerman (ed). *Soil testing and plant analysis*. 3<sup>rd</sup> ed. SSSA Book Series 3, Madison WI : 45-71.
- Diatta S. 1996. Les sols gris de bas versant sur granito-gneiss en région centrale de la Côte d'Ivoire : organisation toposéquentielle et spatiale, fonctionnement hydrologique. Conséquence pour la riziculture. Thèse unique de doctorat, Université Henri point carré Nancy I, France.181p.
- Edou-Minko A, Mba SE, Eba F, 2003. L'état de fertilité du complexe absorbant des sols du plateau manganésifère d'Okouma (Gabon). *Rev. CAMES - Série A*, vol. 02, 2003 : 15-24.
- Fageria NK, Santos AB, Lins IDG, Camargo SL, 1997. Characterization of fertility and particle size of varzea soils of Mato Grosso and Mato Grosso do sul states of Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. Volume: 28, Issue: 1, Pages: 37-47.
- Gee GW. et Bauder JW, 1986. Particle-size analysis. In : *Methods of soil Analysis*. Part 1: *Physical and Mineralogical Methods* (ed. A. Klute). American society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI: 383-411.
- Genot V, Colinet G, Brahy, Bock L, 2009. L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne (adapté du chapitre 4-sol 1) de « l'état de l'environnement wallon 2006-2007 ». *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2009, 13 (1) : 121-138.

- Kainer KA, Wadt LHO, Staudhammer CL, 2007. Explaining variation in Brazil nut fruit production. *Forest Ecology and Management* 250:244-255.
- Landon JR, 1991. Booker tropical soil manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics. Oxon, UK : Longman. 500 p.
- Lucas Y, Luizao FJ, Chauvel A, Rouiller J, Nahon D, 1993. The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. *Science/original*: 418-4113.
- Marques JJ, Teixeira WG, Schulze DG, Curi N, 2002. Mineralogy of soils with unusually high exchangeable Al from the western Amazon region. *Clays Minerals*, 37: 651-661.
- Mbonigaba JJM, Nzeyimana I, Bucagu C, Culot M, 2009. Caractérisation physique, chimique et microbiologique de trois sols acides tropicaux du Rwanda sous jachères naturelles et contraintes à leur productivité. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2009, 13 (4) : 545-558.
- Moreira A. and Fageria NK, 2009. Soil Chemical Attributes of Amazonas State, Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, 40 : 17, 2912-2925.
- Mustapha S, 2007. Physico-chemical properties and fertility status of some Haplic Plinthaquults in Bauchi local government of Bauchi State, Nigeria. *Int. J. Soil Sci.*, 2 (4), 2007 : 314-319.
- Olsen SR. et Sommers LE, 1982. Phosphorus. In *Methods of soil analysis*. Ed Page *et al.*, Madison, Wisc.: ASA and SSSA : 403-430.
- Pallo FJP, Sawadogo N, Sedogo PM, Assa A, 2008. Statut de la matière organique des sols dans la zone sud-soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2008, 12 (3) : 291-301.
- Parent LE. et Dafir M, 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *Journal of American Society of Horticultural Science*, 117 : 239-242.
- Pimentel Gomes F. and Garcia CH, 2002. Applied statistic to elementary agronomy and forestry. Piracicaba, Brazil: FEALQ. 309 p.
- Römheld V. and Kirkby EA, .2010. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant Soil*, 335 : 155-180.
- Shein EV, 2009. The particle-size distribution in soils: problems of methods of study, interpretation of results, and classification. *Eurasian soil science*, 2009, vol. 42, N° 3 : 284-291.
- Thomas GW, 1982. In : *Methods of soil Analysis : Part 2. Chemical and Microbiological Methods* (eds Page A. L., Miller R. H. et Keeney D.R.). American society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI : 159-165.
- Thomas GW, 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods Part 3*. Soil Science Society of America Inc, American Society of Agronomy, Inc Madison, Wisconsin, USA : 475-490.
- Troeh F. R. and Thompson LM, 2005. Soils and soil fertility. 6<sup>th</sup> ed. Oxford, UK: Blackwell Publishing. 156 p. Walkley A. et Black IA, 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.*, 37 : 29-38.

## **2<sup>ème</sup> PUBLICATION HORS THÈSE**

Nangah K. Y., Angui K. T. P., **Kouakou Y. K. N.**, Yao G. F., Alui K. A., N'Guessan K. A., Yao-Kouamé A. and Savané 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 (JBES), Vol. 3, N°1, p. 23-32.



## Assessment of morphological and geological environment of manganese containing area in South West of Côte d'Ivoire

Krogba Yves Nangah<sup>1\*</sup>, Kouassi Tehua Pascal Angui<sup>1</sup>, Yao Kouman Nestor Kouakou<sup>2</sup>, Guy Fernand Yao<sup>2</sup>, Konan Alphonse Alui<sup>2</sup>, Kouame Antoine N'Guessan<sup>2</sup>, Albert Yao-Kouame<sup>2</sup>, Issiaka Savane<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Géosciences et Environnement/UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement (SGE) / Université Nangui Abrogoua (Côte d'Ivoire) / 02 BP 801 ABIDJAN 02 RCI

<sup>2</sup>Département de pédologie / UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM) / Université Félix Houphouët Boigny (Côte d'Ivoire) / 22 BP 582 ABIDJAN 22 RCI

Article published on January 21, 2013

**Key words:** Manganese containing deposits, brunified soils, lens ore, dismantling ore, hardened ore, Côte d'Ivoire.

### Abstract

The vast majority of manganese indices in the southern Ivorian are closely associated with the birimian formations. Manganese containing formations are mainly located in the upper part of the birimian, particularly in a volcanic and sedimentary environment. Indeed, the Guitry environment includes sedimentary, volcano-sedimentary, and metamorphic formations intruded into various granitoids. Their alteration leads to three major genetic types of minerals: ore in forms of interstratified lenses in the schist from direct oxidation of gondites; dismantling ore from these lenses, forming clusters of blocks, resulting from in situ fragmentation of the previous ore; hardened ore linked to the process of alteration and leaching of the above mentioned ores, then a concentration of manganese following a lateritic type pedological profile. The most economically interesting deposit consists of dismantling surface areas, including highly enriched clusters (90 % of exploitable ore), where manganese is found only in the form of secondary oxides, packaged in a clay soil. During the eburnean orogenesis, the initial manganese containing sediments were transformed to varying degrees in metamorphic rocks. Soils derived from the alteration of these birimian rock formations are known as brunified soils.

\*Corresponding Author: Krogba Yves Nangah ✉ [nangahk@yahoo.fr](mailto:nangahk@yahoo.fr), [krogba@gmail.com](mailto:krogba@gmail.com)

## Introduction

While the morphogeology is characterized by landscapes whose appearance depends on the nature of rocks, the morphopedology is a pedological and geomorphological approach to the study of soils aiming to show that the beginning and the evolution of soils are also dependent on the relief. It is also a naturalist approach of the study of landscapes (Benabbas *et al.*, 2008; Rossi, 1989).

Pedology integrates morphological and geological information through data on texture, natural soil drainage, profile, and derived series (Closson *et al.*, 1999).

The foundations of the geomorphopedological approach are based on the fact that the model is a major element of agrarian landscape structure. By combining concepts of space and time, this method proceeds from general to particular. Loukili *et al.* (2004), see the landscape as a nested set of interrelated structures, the biggest including and explaining the smallest (Bertrand *et al.*, 1985).

The achievement of such inventories are done on field, based mainly on observations of soil accurately described (surveys, profiles, reference sectors), but highly located in the space.

That is why we based the characterization of geological and pedological of manganese containing environment of Lauzoua on field studies. Field studies are known to make clear the microstructural features of localized deformation zones, including minerals precipitations, and the understanding that the physical processes that govern at various scales these mechanisms are fundamental. In fact, it is to observe a few rocky outcrops, to describe the entire pedological horizons and landscape elements (vegetation, effects of human activities, geomorphology, hydrology, native rocks or substrates) whose spatial organization can define the whole or any part of a pedological cover (Baize and Girard, 1998).

Existing studies on the manganesiferous sites of Côte d'Ivoire were interested in the search for manganese mining while overlooking soil aspect (Grandin, 1968 ; Grandin and Perseil 1977), whereas the soil is an essential component of development.

The objectives of the investigation are to study the morphology and geology environment of mangiferous sites in relation with soil formation and physicochemical properties in order to better apprehend the future use of these soils for sustainable development.

## Material and methods

### *Site of the study*

The manganese mine of Lauzoua is located south of the leaf of Guitry (limited by the meridians 5° West and 6° West and the parallels 5° North and 6° North). The region of Guitry is covered by the tropical forest. The climate is hot and humid with heavy annual rainfall (1470 mm / year) governed by two dry seasons and two rainy seasons, with temperatures varying from 27 to 37°C. This area is drained by numerous rivers (Go, Boubo, Davo, Bolo, and Dagba) flowing into lagoons (Makey, Tadio, and Nyouzomou Katibo) and, communicating with the sea near the town of Guitry.

### Methods

Geological prospection consisted in identifying and describing the rocky outcrops on the face and the rest of the perimeter of the permit. The material used mainly consisted of geological prospecting tools. Rocks samples in the exploration area were collected during the field work and thin layers were manufactured in the PETROCI laboratory of Abidjan. These thin sections were studied in the laboratory of the Department of Geology.

A lithological description was then made for each dark well by identifying the horizons in which the description focused on texture, color, presence or not of organic matter, general structure, cohesion, porosity, abundance and length of the roots, structure, and drainage. The observations of soil

were made following the change in topography. Thus we have considered profiles of top, mid, and bottom of slope. Soil samples (12 samples) were collected on three profiles. The study of morphopedologic environment is based on a morphopedological diagnosis and the recognition of likely pedologic systems (Ruellan and Dosso, 1993) by soil profiles. To this end, compilation of available cartographic

documents and variable related documents known to be correlated with soil properties are commonly performed.

Oxides determined in rocks and soils indicate that the materials are relatively rich in silicon and iron oxides and slightly hydrated (Table 1).

**Table 1.** Results of geochemical analysis of soils and rocks in the study area.

N° of profile	Horizon	Depth (cm)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MnO (%)	Humidity (%)
O 24	A1	0 - 5	32.14	6.56	1.41	5.88
	A3	5-20	29.94	8.96	2.18	5.13
	B11	20 - 70	26.55	9.11	1.54	4.18
	B12	70-130	27.75	9.46	0.90	3.84
O 20	A1	0 - 5	31.77	6.28	2.70	10.43
	A3	5-20	33.40	6.69	2.70	10.25
	B12	20 - 40/50	34.20	6.97	1.93	6.97
	B21	40/50 - 120	25.27	7.84	1.67	6.98
O18	A1	0 - 3	40.72	5.12	4.11	11.64
	AB	3-40	43.33	8.12	4.63	19.55
	C	40-85	43.00	6.84	7.84	17.21

**Results**

Results presented here are related to the geomorphology dictated by the geology and the soils of the station. The major part of the relief in the area under study is dominated by a chain of hills oriented North-East, South-West, with summits ranging from 103 m to 144 m from South-West to North-East.

In terms of geology, manganese containing deposits of Lauzoua are located in a sedimentary and volcano-sedimentary birimian area, intruded by granodiorite dominant massifs. The sediments consisted mainly of arkose, arenite, politic sandstone, and lutites. They are poorly evolved and contain quartzofeldspathic detritical angular elements into clay-sericitic cement. The greenish volcanosedimentary series due to the abundance of

chlorite and amphibole are represented by an undifferentiated volcanic complex.

Located at the extreme west of the Lauzoua area, hornblende and/or biotite metagranodiorites, are quite dark colored rocks with medium grain locally porphyroidic. They represent the eastern edge of a large massif oriented NNE-SSW.

The main geological formations encountered in the study area (Fig. 1) are divided into mataarenites, ampelites, manganese containing ampelites (gondites), metarhyolites, metadacites, and undifferentiated metavolcanites. Metaarenites occupied the S-E strip of the permit. Macroscopically, it is a peppery, greenish colored rock. Microscopically, this facies is mainly composed of quartz grains, feldspath elements of

varying sizes and more or less rounded shapes organized in a quartzo-feldspathic or chloritic matrix (Fig. 2). The percentage of feldspath compared to quartz is highly variable from one sample to another.

Locally, it shows microconglomeratic levels, where detrital quartz and feldspathic elements can reach a size of 1.5 to 2 mm (Fig. 2). We also observed millimetric beds beveled by ferromagnesian minerals in a finely grained facies.

Ampelites and manganese containing ampelites are found in centre and the north-west of the permit. Manganese containing ampelites are redeemed between typical ampelites and metaarenites (Fig. 3). The dominant facies are finely arranged black schist, graphitic in some places. They are cut by cracks and white calcite veinlets and number of quartz veins. The most manganese containing facies, with indurated appearance include gondites with manganese containing garnets and cubic pyrite.

Located in the northwest of the permits, metarhyolites and metadacites form a strip oriented North-East South-West. They are gray-clear to slightly dark gray, porphyritic by the presence of millimetric feldspath and ferromagnesian microliths.

Undifferentiated metavolcanites form the frame of the series of plateaus in the west of the chain of hills. They are very dark, dense and finely grained. Microscopic observations show tangled actinotes and relics of calcic plagioclase (high relief) plus almost rectangular opaque crystal minerals such as magnetite or cubic as pyrite. This composition is similar to that of an amphibolite derived from metamorphosed basalt (Fig. 4). Laminated or schistic formations have a direction varying one hand from N 048° to N 052°, with dips of 40° to 70° NW and, on the other hand, from N 043° with a dip of 50° SE, which highlights an antiform axis. The schistosity is locally jagged (Figure 5). Microscopic

observations, show symmetrical shadow pressures referring to a pure flattening (Fig. 6) and sigmoid shadow pressures (Fig. 7) formed in sheared environment. In the latter case, the direction of the sigmoid asymmetry helps deduce the direction of the shearing.

Therefore, the main mineral found in rocks in the area under study are quartz, plagioclase, the microcline and brown-green biotite clusters, with associated minerals constituted of pistachite, apatite, and zircon.

The manganese containing rocks of the volcano-sedimentary complex of Lauzoua include mainly gondites to dialogite ( $MnCO_3$ ) or braunite ( $Mn_7SiO_{12}$ ).

These gondites are metamorphosed equivalents of manganese containing silica or clay derived from volcanism. With a black or gray color, and very fine grains, they are mainly characterized by the presence of spessartine and quartz. There is often a little amphibole (tremolite or actinote). These rocks are locally collected in graphitic schist.

Their alteration leads to three major genetic types of minerals: lens ores, dismantling ores, and hardened minerals.

#### *Lens ores*

The lens ores interstratified in schist/gondites constituted the resistant armature of the chain of hills (Fig. 8). It consists of a black rock, very hard, very dense, which does not stain the fingers. This rock, loosely layered to schistic, marked by thin layers of graphite, is traveled by many calcite white veinlets. The ore is effervescent in presence of acid.

#### *Dismantling ore*

The positioning of the dismantling ore is dependent on the surface topography (Fig. 9). It covers the heads of lenses in form of blocks clusters, chunks and granules or nodules embedded in the surface

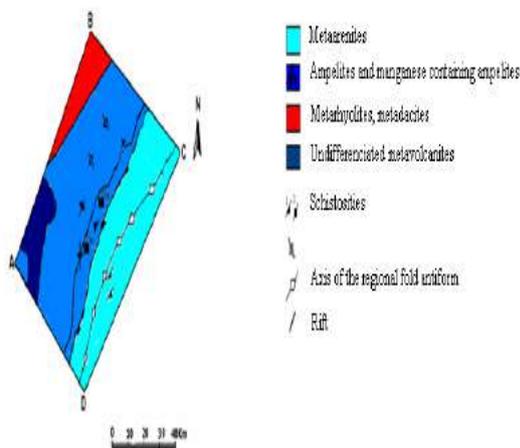
clay. These eluvial clusters highly enriched (90% of exploitable ore) are located on the plateau or in the upper slopes, where manganese is in the form of secondary oxides, packaged in a clay soil.

**Hardened ore**

It systematically presents a concretioned massif without bedding (Fig. 10). It is often crossed by veinlets with fibrous crystals and contains clay pockets. This ore occupies the hills on gentle slopes.

**Discussion**

Based on the lithological descriptions, we are in a volcano-sedimentary environment. Several types of structures were observed in this volcano-sedimentary series: stratification, flattening and shearing plans, in addition to a schistosity of crenelation N120°, indicating a final tightening phase of regional scope.

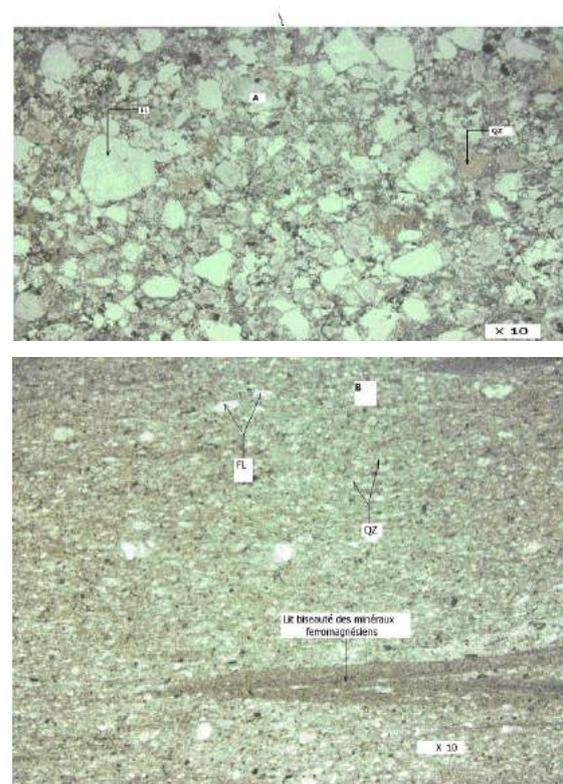


**Fig. 1.** Outline of geological formations of the study area Already recognized in the work of Vidal and Alric (1994), this crenelation has recently been better documented in the N-E of Ivory Cost by Pouclet *et al.* (2006), who included some major plicative structures WNW-ESE.

As for all Ivorian deposits, the origin of manganese can be fairly discussed.

Manganese can come from hot sources related to submarine volcanism and be deposited in the form

of oxides or carbonates. It can also come from lava themselves. We could then find it in a dispersed form and absorbed by very fine clay sediments that characterize the period of the emptiness of its ophiolitic activity. In the presence of calcium, it might be concentrated in local accumulations of silica gels and give manganese containing jaspers. On the other hand, this manganese containing colloidal silica intimately included in the sediments, which will further form cinerites, contemporary manganese containing siliceous and clay tuffs, and ophiolitic emissions themselves (Pouclet *et al.* 2006).

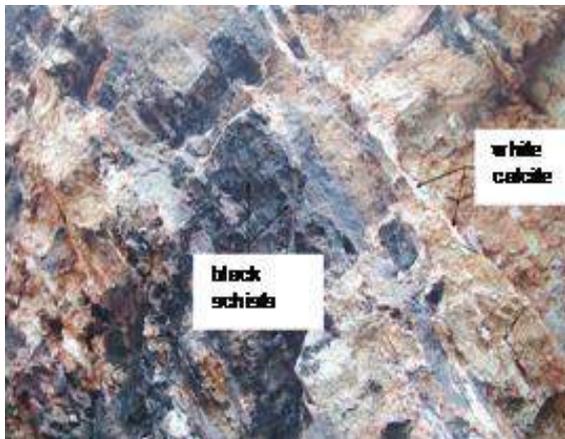


**Fig. 2.** Micromorphology of variable size quartz and feldspath detritic elements.

**QZ: Quartz; FL: Feldspath**

Depending on local conditions, the concentrations may be natural, both lithologically and level related, may present abrupt changes in sedimentation or levels when the geochemical conditions of the basin are modified. From a space point of view, manganese appears to have been concentrated in small basins in the vicinity of ophiolitic emissions.

This deposit could be more or less long, probably cyclic (frequent repetition of sequences of sterile sediments - mineralized sediments), but there are distortions in each path in a determined period, as evidenced by the clear alignment of mineralization in a defined stratigraphic horizon. During eburnean orogenesis, initial manganese containing sediments were turned to varying degrees to metamorphic rocks. Thus, under the action of metamorphism, initial manganese containing sediments will give rise to gondites, with a predominance of spessartine and quartz (Grandin and Perseil, 1977)

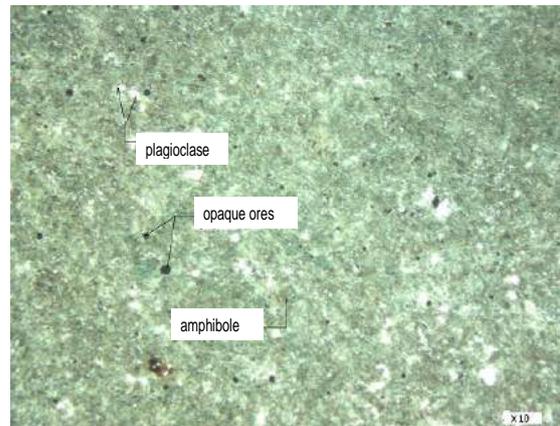


**Fig. 3.** Black schists and white calcites (manganese containing ampelites).

Relate to this episode, are local formations of manganese containing carbonates and silicates such as braunite ( $Mn_7SiO_4$ ), dialogite ( $MnCO_3$ ) observed in the deposit of Lauzoua. The supergene alteration of these primary minerals will give rise to secondary formations represented mainly by oxides (Grandin and Perseil, 1977). Indeed, all deep searching (up to 60 m) made in the richest deposits of Mokta (Perseil and Grandin, 1985) showed a decline in soil oxides contents as the supergene alteration of initial manganese containing rocks lessened.

This finding, also made in deep trenches, seems to confirm the absence of primary concentration of oxides. This study suggest that the vast majority of

Ivorian oxidized ores results from a supergene alteration, which is confirmed by the microscopic or Metallographic study of silicate or carbonate primitive rocks at different stages of alteration (Perseil and Grandin, 1985). Affected zone rarely exceeds 20 to 30 meters. The supergene alteration of Ivorian deposits may be placed in a general context of the laterization. By laterization we mean a chemical type alteration, which grows mainly in intertropical humid zones, and is characterized by dissolutions, damages, and neoformations.



**Fig. 4.** Microphotograph showing an amphibolite (undifferentiated metavolcanite).

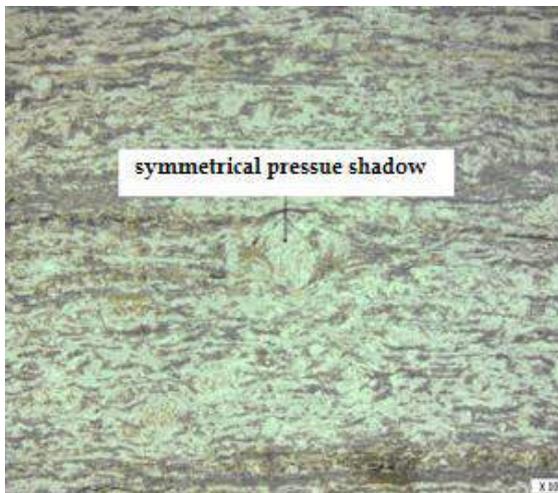
During laterization, manganese may, like iron, remain in true solution under its bivalent form, but can also form amphoteric hydroxides, which can be easily precipitated by hydrolysis (in low pH conditions) in tetravalent form. It will than constitute a residual products of lateritic alteration (Wedepohl, 2004).

The alteration of gondites depends largely on their composition. In gondites, oxidation of garnet occurs mostly from inside of crystal, along microcracks. Then the contour of grains fades, and it remains only cracked garnets and garnets hollowed out in cavities, drowned in a wad and psilomelanes base. Quartz can survive in more or less regular beds or beaches (Perseil and Grandin, 1985).



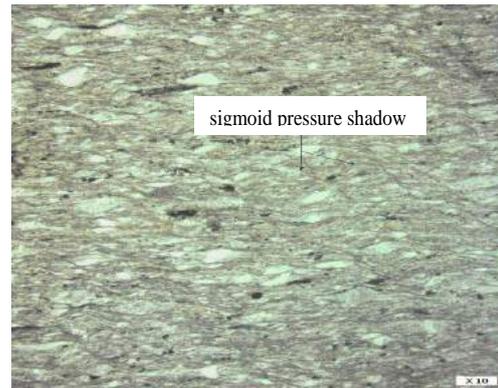
**Fig. 5.** Microphotograph showing a crenelated schistosity observed in black schists.

The spessartines deteriorate fairly easily, but the occurrence of a rich ore is more difficult for gondites, dialogite, or braunite. The gonditic ores usually contain a fairly high proportion of silica, and to a lesser extent, of alumina and iron (Grandin, 1968).



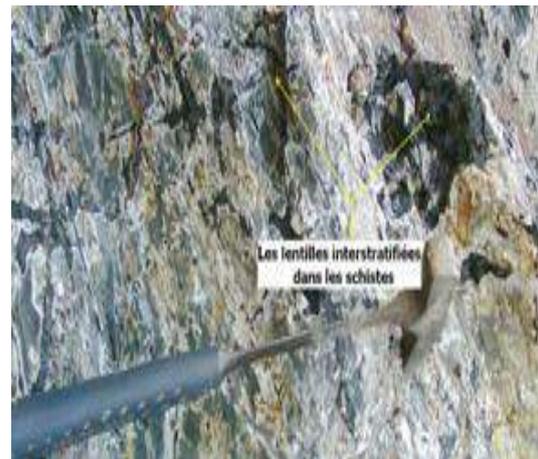
**Fig. 6.** Microstructure of a pure symmetrical flattening pressure shadow.

The gondites to dialogite or braunite are mainly found in the rich deposits of Mokta, and it is likely that this wealth is due in part to the alteration of these compounds. Rich minerals sometimes show a few relics.



**Fig. 7.** Microstructure of shearing sigmoid pressure shadow.

While the manganese containing protore of Lauzoua has a precambrian origin, the occurrence of the deposit, economically speaking would have occurred in the tertiary (Grandin and Perseil, 1977). In general, the secondary evolution of Ivorian deposits is quite complex. There are often the successions of two generations of oxides and numerous pseudomorphosis. The reason for that could be the succession and the alternation of very different climates during their long evolution, and the numerous resulting variations of the hydrostatic level (Perseil and Grandin, 1985).



**Fig. 8.** Partial View of interstratified lenses in schists

In the area of Lauzoua there are metagranodiorites and birimian rocks represented by volcano-

sedimentary formations. Under the action of atmospheric conditions these rocks will undergo alteration processes. These intensive processes cause the rupture of crystalline networks. The components of the rocks are individualized in simple forms:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ , etc..., which will be immobilized, or be removed, or partially recombined, depending on the drainage conditions. Soil is the result of all these changes in relation to organic matter. Indeed, the pedological covering, with harmonized lithic and crumby indurate formations, which serves as support vegetation, helps understand the stages of the genesis and evolution of the observed surface formations, and their influence on forest dynamics and the phytogeographical distribution (Beyala *et al.*, 2001). The comparison of the results of the analysis made on rock and soil samples reveals that :



**Fig. 9.** Partial view of the dismantling ore.

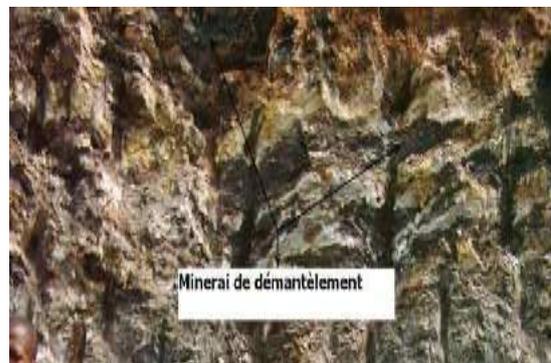
Silica is present in almost identical proportions in both the soil in the rocks. This seems obvious given the volcano-sedimentary environment. Iron is present in the soil with relatively high levels, probably because of differential alteration processes: the removal of certain elements involving the concentration of others.

The high concentration of manganese in the rocks, while very low in soils can be explained by a very thorough leaching process.

The reverse evolution of the levels of manganese and iron along the toposequence suggests a replacement of iron by manganese; however, iron

and manganese levels found in soils analyzed could not permit any mining exploitation.

Lauzoua belongs to the area of soils moderately leached. From our field studies, we have identified brunified land whose vast expansion suggests the possibility of introducing new crops in this region already dedicated to agriculture. And we are currently witnessing a strengthening of the links between production and land, as was noted Chevry and Gascuel-Odoux (2002). At present, agriculture must control the flow of elements while contributing to the preservation of the environment (Surendran and Murugappan, 2010), hence the need to take into account pedogenetic differentiation factors, topography (Colinet, 2003), as well as the history of contributions on the site (Arrouays *et al.*, 2000) because we know that the levels of elements in a soil, at a given period, result from pedogenetic evolution of the material with its own contents, the rocks chemistry influencing the soil's one, and the balance input/loss which can be greatly influenced by human activities (Janjirawuttikul *et al.*, 2011; Warin *et al.*, 2004).



**Fig. 10.** Partial view of Hardened ore.

Therefore, it is important to take into account the existence of this geomorphological continuum, in line with the idea put forward by Wright *et al.* (2004) who proposed to focus on the continuum of variation more than cutting into very different strategies, or the idea consisting to establish the link between the variability of the functional diversity of vegetal populations and ecosystem properties (Ansquer, 2006). The crumby formations observed,

combined with the use of lands and the rates of the vegetal covering, allow making a distinction between geoecological units which constitute an important basis for assessment of the potential of a given ecosystem (Yusuf and Yusuf, 2008).

### Conclusion

The geological context of the deposit indicates the presence in its western part, of massive green rocks (amphibolites green hornblende), and in its eastern part, of a chain of hills composed of interstratified green rocks in locally graphitic schist.

The gondites to dialogite ( $MnCO_3$ ) or braunite ( $Mn_7SiO_{12}$ ) are the primary ore deposit of Lauzoua. It is their alteration that gives rise to three types of minerals: interstratified lens ore in schist, dismantling ore of these lenses forming blocks clusters, resulting from the in situ fragmentation of the preceding ore, and hardened ore linked to the alteration and the leaching of above mentioned ore, then reconcentration of manganese in a lateritic type pedological profile.

The more economically attractive part of the deposit consists of dismantling surface areas, including very rich clusters (90% of exploitable ore), where manganese is found only in form of secondary oxides packaged into a clay soil.

This work allowed establishing a link between the geology and the different types of manganese ore. Indeed, the study of the natural environment is gaining interest when combined with geological and geomorphological information. This is called the geo-morpho-pedological approach. The geology provides an overview of the system but imprecisely locate the position of the clay layer responsible for the landslide for example. Geomorphology clarifies this localization through elements reflecting the possible presence of a crumbly rock.

### References

- Ansquer P.** 2006. Caractérisation agroécologique des végétations prairiales naturelles en réponse aux pratiques agricoles. Apports pour la construction d'outils de diagnostic. Thèse de Doctorat, INRA, INP ENSAT, SEVAB, p. 261.
- Arrouays D, Martin S, Lepretre A, Bourennane H.** 2000. Short-range spatial variability of metal contents in soil on a one hectare agricultural plot. Communications in Soil Science. Plant Anal **31**, 387-400.
- Baize D, Girard MC,** 1998. A Sound Reference Base for Soils : The "Référentiel Pédologique". Eds Quae, p. 322.
- Benabbas C, Zeghdoud O, Boumedous S.** 2008. Morphogeological features, neotectonics and instabilityland in eastern Algeria (Case of Constantine). Revista de geomorfologie **10**, 23-29.
- Bertrand R, Kilian J, Raunet M, Guillobez S, Bourgeon G.** 1985. La connaissance des systèmes de paysages naturels, un préalable à la protection du milieu. L'approche morphopédologique. Recherche AgronomieGembloux **20**, 545-559.
- Beyala KKV, Ekodeck GE, Konfor, NI.** 2001. Geochemical evolution of laterites in the preforest ecosystem on Southeast Cameroon : the Kandara area. AJST **2**, 19-32.
- Cheverry C, Gascuel-Oudou C.** 2002. Les Français et leurs sols : essai de prospective à l'horizon 2030. Courrier Environnement **47**, 5-14.
- Colinet G.** 2003. Elements traces dans les sols. Contribution à la connaissance des déterminants et de leur distribution spatiale en région limoneuse Bèlge. Thèse de Doctorat. Univ. Sc. Agron. Gembloux, Belgique, p. 416.

**Closson D, Engels P, Demaret X.** 1999. The use of the soil map of Belgium in the assessment of landslide risk. *Biotechnologie Agronomie Société et Environnement* **3**, 165-172.

**Grandin G.** 1968. Exogenesis aspects of the manganese deposit of Grand Lahou (Côte d'Ivoire). *Chronologie Mines et Recherches Minières* **36**, 199-206.

**Grandin G, Perseil EA.** 1977. The manganese deposit of Mokta (Ivory Coast). Mineralogical transformations of minerals by meteoric action. *Bulletin de la Société géologique de France* **7**, 309-317.

**Janjirawuttikul N, Umitsu M, Tawornpruek S.** 2011. Pedogenesis of acid sulfate in the lower central plain of Thailand. *International Journal of Soil Science* **6**, 77-102.

**Loukili M, Bock L, Engles P, Mathieu L.** 2000. Approche géomorphologique et Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour la gestion des terres au Maroc. *Etude et Gestion des Sols* **7**, 37-52.

**Perseil EA, Grandin G.** 1985. Altération supergène des protores à grenats manganésifères dans quelques gisements d'Afrique de l'Ouest. *Mineral. Deposita* **20**, 211-219.

**Poulet A, Doumbia S, Vidal M.** 2006. Geodynamic setting of the Birimian volcanism in central Ivory Coast (western Africa) and its place in the Palaeoproterozoic evolution of the Man Shield. *Bulletin de la Société Géologique de France*, March 2006, v, p. 177.

**Rossi G.** 1989. Examples of tropical morphopedology. *Soltrop* **89**, 87-105.

**Ruellan A, Dosso M.** 1993. Regards sur les sols. Collection « Universités francophones », Éditions Foucher-AUPELF, Paris, p. 192.

**Surendran U, Murugappan V.** 2010. Pragmatic approaches to manage soil fertility in sustainable agriculture. *Journal of Agronomy* **9**, 57-69.

**Vidal M, Alric G.** 1994. The palaeoproterozoic (Birimian) of Haute-Comoé in the West African craton, Ivory Coast: a transtensional back-arc basin. *Precambrian Research* **65**, 207-229.

**Warin A, Bernaerdt R, Delcarte E, Maesen Ph, Naud J, Marcoen JM.** 2004. Development of a harmonized system for monitoring the quality of land in the Walloon Region anticipating the future European directive on soil. *Biotechnologie Agronomie Société et Environnement* **8**, 69-82.

**Wedepohl KH.** 2004. The composition of Earth's upper crust, natural cycles of elements, natural resources. In : Merian E., Anke M., Ihnat M., Stoeppler M. (ur.) *Elements and their compounds in the environment*, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, vol. **1**, str. 2-16.

**Wright IJ, Reich P, Westoby M, Ackerly DD, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin FS, Cornelissen JHC, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom PK, Gullas J, Hikosaka K, Lamont BB, Lee T, Lee W, Lusk C, Midgley JJ, Navas ML, Niinemets U, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov VI, Roumet C, Thomas SC, Tjoelker MG, Veneklaas EJ, Villar R.** 2004. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature* **428**, 821-827

**Yusuf AA, Yusuf HA.** 2008. Evaluation of strategies for soil fertility improvement in Northern Nigeria and the way forward. *Journal of Agronomy* **7**, 15-24.

## **3<sup>ème</sup> PUBLICATION HORS THÈSE**

Nangah K. Y., Angui K. T. P., **Kouakou Y. K. N.**, Rusu E., Yao-Kouame 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*, Vol. 2, N°4, pp. 372-383.

## Teneurs en éléments traces métalliques (ETM) dans quelques sols manganésifères dérivés de matériaux volcano-sédimentaires de Côte d'Ivoire

### [ Contents of metal trace elements (ETM) in some manganiferous soils derived from volcano-sedimentary materials in Côte d'Ivoire ]

*NANGAH Krogba Yves<sup>1</sup>, ANGUI Kouassi Tehua Pascal<sup>1</sup>, KOUAKOU Yao Kouman Nestor<sup>2</sup>,  
RUSU Eugen<sup>3</sup>, YAO-KOUAME Albert<sup>2</sup>, and SAVANE Issiaka<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Laboratoire Géosciences et Environnement,  
Université Nangui Abrogoua,  
Abidjan, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>Département de Pédologie,  
Université Felix Houphouët Boigny,  
Abidjan, Côte d'Ivoire

<sup>3</sup>Département de Géographie et de Géologie,  
Université Alexandru Ioan Cuza,  
Iasi, Roumanie

---

Copyright © 2013 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** Manganiferous soils have high contents of manganese, which, combined with trace elements could affect the physico-chemistry of the soil and lead to serious hazard on the environment and human. This study aims to assess the levels of trace elements on manganiferous soils of Côte d'Ivoire. A recognition site by manganiferous soil survey on three areas was applied. In these manganiferous soils abundance order of ETM, each site individually, is identical to the global abundance order : (Fe > Mn > Cu > Zn > Cr > Ni > Pb > Co > Cd). However, a difference is observed in Korhogo, at Ni > Cr. Among the ETM studied, Cu (172.8 mg.kg<sup>-1</sup>), Zn (110.73 mg.kg<sup>-1</sup>), Cd (1.06 mg.kg<sup>-1</sup>) and Mn (9228.96 mg.kg<sup>-1</sup>) are in the range of critical levels in soils, which can cause toxicity. A North-South gradient of increasing accumulation is for Cd. The opposite is observed for Zn. Mn is more abundant in Guitry but low in Bondoukou. Other ETM (Fe, Ni, Cu, Pb and Co) are more or less homogeneous in the different study areas. Dynamics and vertical distribution of ETM is very variable depending on the area and is mainly influenced by pedogenetic processes. The pH is frankly acids in these soils. A study on the speciation of trace metals in these soils should be conducted to better prevent potential contamination of environment.

**KEYWORDS:** ETM, manganiferous soils, toxicity, pH, volcano-sedimentary, Côte d'Ivoire.

**RESUME:** Les sols manganésifères sont des sols à fortes teneurs en manganèse, qui, associées aux éléments traces métalliques, pourraient avoir des conséquences sur la physico-chimie des sols, et induire de graves danger sur l'environnement et l'homme. Cette étude a pour objectif d'évaluer les teneurs en éléments traces métalliques des sols manganésifères de Côte d'Ivoire. Une reconnaissance des sites manganésifères par prospection pédologique sur trois zones a été appliquée. Dans ces sols manganésifères, l'ordre d'abondance des ETM de chaque site, pris individuellement, est identique à l'ordre d'abondance global (Fe > Mn > Cu > Zn > Cr > Ni > Pb > Co > Cd). Néanmoins, une différence est observée à Korhogo, au niveau de Ni > Cr. La plupart des ETM présentent, des corrélations significatives entre eux, au seuil  $\alpha = 0,05$  ; seuls Ni et Co ne présentent pas de corrélation significative, ni avec les autres ETM, ni entre eux. Parmi les ETM étudiés, les teneurs en Cu (172,8 mg.kg<sup>-1</sup>), Zn (110,73 mg.kg<sup>-1</sup>), Cd (1,06 mg.kg<sup>-1</sup>) et Mn (9228,96 mg.kg<sup>-1</sup>) se situent dans la gamme des teneurs critiques dans les sols, pouvant entraîner des phénomènes de toxicité. Un gradient Nord-Sud croissant

d'accumulation, est marqué pour Cd. L'inverse est observé pour Zn. Mn est plus abondant à Guitry, mais faible à Bondoukou. Les autres ETM (Fe, Ni, Cu, Pb et Co) restent plus ou moins homogènes sur les différentes zones étudiées. Les pH étant franchement acides dans ces sols, une étude sur la spéciation des éléments traces métalliques dans ces sols devra être menée afin de mieux prévenir d'éventuels risques de contamination environnementale.

**MOTS-CLEFS:** ETM, sols manganésifères, toxicité, pH, volcano-sédimentaire, Côte d'Ivoire.

## 1 INTRODUCTION

Les micropolluants inorganiques ou ETM sont naturellement présents dans les sols, sous une forme, le plus souvent, peu mobile, et à des teneurs très faibles. Leur origine est liée à leur présence dans la roche mère « fond pédogéochimique ». 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 ETM [1]. Comme ce comportement accumulateur des sols vis-à-vis des ETM est irréversible, lorsque ces ETM deviennent mobiles, ils peuvent présenter de sérieux dangers dans l'environnement [2] et [3].

Les sols manganésifères de Côte d'Ivoire sont issus de matériaux volcano-sédimentaires. Or, de nombreuses études ont montré que les formations volcano-sédimentaires et les sols manganésifères montrent des concentrations excessives en éléments traces métalliques (ETM), ce qui occasionne des teneurs très élevées de ces éléments dans les sols dérivés de ces formations géologiques [4], [5], [6] et [7]. Les éléments traces métalliques (ETM) contenus dans les sols manganésifères peuvent être transportés dans les différents compartiments de l'environnement (plantes, eau...) et, atteindre l'homme [8], causant sur celui-ci, de graves dommages.

La littérature ne faisant aucunement état d'études pédogéochimiques réalisées sur les sols manganésifères de Côte d'Ivoire, issus de matériaux volcano-sédimentaires, il est apparu opportun de procéder à l'évaluation des teneurs en éléments traces métalliques de ces sols, en vue de la constitution de bases de données de références pour une appréciation rationnelle de l'impact des activités futures, notamment sur l'environnement et l'agriculture et de prévention d'éventuels risques.

## 2 MATERIELS ET METHODES

Le choix de nos différentes zones d'étude s'est essentiellement basé sur des critères lithologiques et pédoclimatiques. A l'aide de la carte géologique de la Côte d'Ivoire, nous avons procédé à l'inventaire des zones à occurrences de manganèse ; puis, en fonction des différentes facettes climatiques, nous avons sélectionné trois (3) zones : toutes des régions de forte production agricole, dont les sols sont développés sur matériau volcano-sédimentaire. Les caractéristiques climatiques et géomorphopédologiques des sites étudiés sont présentées au tableau 1.

**Tableau 1.** *Caractéristiques des zones d'études*

Caractéristiques	Guitry (Lauzoua)	Bondoukou (Kanguélé)	Korhogo (Dassoumbélé)
Coordonnées géographiques	5°20'5" N et 5°23' W	8°6'43" N et 2°42'23" W	9°23'27"N et 5°48'49"W
Précipitation moyenne annuelle (mm/an)	1400 à 2500	1100 à 1700	1000 et 1200
Températures moyennes mensuelle (°C)	25 à 33	22 à 27	26 (12 à 39)
Climat	Attién	Baouléen	Soudanais
Humidité relative moyenne (%)	80 à 90	70	65
Végétation naturelle	forêt sempervirente	Savane arborée	Savane arbustives
Matériel parental	Volcano-sédimentaire	Volcano-sédimentaire	Volcano-sédimentaire
Type de sol	Cambisols	Cambisols	Cambisols

#### **ECHANTILLONNAGE ET CODIFICATION DES HORIZONS**

Une prospection pédologique (ouverture de fosses) a permis la caractérisation des différents types de sol des zones d'étude. Au total, 37 horizons de sol ont été échantillonnés pour analyse en laboratoire.

Les horizons, d'épaisseur différente, qui ont été identifiés dans les solums ont été codifiés par la suite en créant des classes de profondeur, notées H<sub>1</sub> (0-20 cm), H<sub>2</sub> (20-60 cm), H<sub>3</sub> (60-80 cm) et H<sub>4</sub> (80-120 cm). La profondeur attribuée à ces codes répond aux critères d'épaisseur de l'horizon organique (0-20 cm) des sols tel que décrit par [9], ainsi qu'à ceux des profils racinaires des cultures vivrières, à savoir : 0-60 cm pour les cultures vivrières à enracinement moyennement profond, 0-80 cm pour celles à enracinement profond ou très profond (0-150 cm), selon les travaux de [10]. Ainsi, chaque horizon est inclus dans une tranche de profondeur (H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub> et H<sub>4</sub>) correspondant à son code.

#### **DETERMINATION DU PH**

La mesure des valeurs de pH a été effectuée par électrométrie, dans une suspension de sol dans l'eau, selon un rapport sol/solvant de 1/2,5 [11].

#### **DETERMINATION DES ELEMENTS TRACES METALLIQUES**

La quantification de la teneur en métal total a nécessité une mise en solution du sol. Les échantillons ont été désagrégés, par minéralisation à voies humides, avec des acides forts (HNO<sub>3</sub>, HCl et HF). Les éléments traces sont ensuite déterminés par un Spectromètre d'Emission Optique, Couplé à un Plasma Inductif (ICP-OES).

#### **ANALYSES STATISTIQUES**

Les données ont été traitées statistiquement, à l'aide du logiciel Statistica 7.1.

L'analyse de variance (ANOVA) a été appliquée aux données pour tester les différences entre les moyennes des teneurs en ETM des zones d'étude. Les relations linéaires des coefficients ont été établies en utilisant le test de corrélation de Pearson à 5%, 1% et 0,1% de significativité [12].

### **3 RESULTATS**

#### **PH**

Les pH sont franchement acides dans les sols manganésifères de Côte d'Ivoire. Les valeurs de pH observées sont dans l'ensemble inférieures à 5,5 (tableau 2).

**Tableau 2. Niveau de l'acidité des sols manganésifères**

Horizon	Korhogo	Bondoukou	Guitry
H1	4,6	5,1	5,2
H2	4,3	5,6	4,9
H3	4,5	5,4	4,8
H4	5,1	5,0	4,8

#### **POPULATION TOTALE DES ETM**

Les concentrations totales ont été mesurées sur les neuf (9) ETM étudiés (tableau 3), 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. Les éléments les plus variables sont Mn, Cd et Zn (CV > 40%) ; les éléments les moins variables sont Fe, Ni et Co (CV < 25%).

La plupart des ETM présentent, de façon globale, des corrélations significatives, au seuil  $\alpha = 0,05$  ; seuls Ni et Co ne présentent pas de corrélation significative, ni avec les autres ETM, ni entre eux (tableau 4).

**Tableau 3. Concentration totale moyenne en ETM (mg.kg-1) dans les sols**

	Cu	Zn	Pb	Mn	Fe	Cd	Cr	Ni	Co
Minimum	84,1	31	4,5	528,75	39702,58	0,001	15,1	12,25	8,25
1 <sup>er</sup> quartile	134,07	69,12	10	2382,12	43499,46	0,5	23,75	22,92	9,87
Médiane	170,25	106,5	15,25	12245,29	46827,58	1	30,25	29,1	12,25
3 <sup>ème</sup> quartile	197,87	145,52	17,87	14215,88	49947,29	1,5	37,55	32,37	14,12
Maximum	325,75	256	24,7	16951,18	52077,58	2,5	49,75	38	16
Moyenne	172,8	110,73	14,32	9228,96	46699	1,06	30,93	27,99	12,15
CV	30	46	36	64	8	63	28	23	20
Ecart-type	51,55	50,25	5,09	5831,9	3454,57	0,66	8,45	6,41	2,38

**Tableau 4. Corrélation de Pearson entre les ETM étudiés des sols dans leur ensemble**

	Cu	Zn	Pb	Mn	Fe	Cd	Cr	Ni	Co
Cu	1								
Zn	<b>0,44</b>	1							
Pb	-0,21	-0,09	1						
Mn	0,12	0,16	<b>0,34</b>	1					
Fe	<b>0,37</b>	<b>0,4</b>	-0,08	0	1				
Cd	<b>-0,38</b>	-0,3	0,03	0,07	<b>-0,33</b>	1			
Cr	0,22	0,17	-0,15	-0,19	<b>0,34</b>	-0,08	1		
Ni	-0,24	0	0,14	-0,05	0,03	0,01	0,1	1	
Co	-0,11	-0,2	0,14	0,09	-0,09	0,23	-0,1	0,12	1

#### DYNAMIQUE VERTICALE DES ETM SUR LES DIFFERENTS SITES ETUDIES

L'ordre d'abondance des ETM de chaque site, pris individuellement, est identique à l'ordre d'abondance global (Fe>Mn>Cu>Zn>Cr>Ni>Pb>Co>Cd). Néanmoins, une différence est observée à Korhogo, au niveau de Ni>Cr.

La dynamique des ETM dans les profils de sols des différents sites étudiés est présentée sur les figures 1, 2 et 3. Les éléments sont regroupés par ordre de grandeur sur les différents graphes.

Les profils de sols de Korhogo présentent une forte teneur en nickel dans l'horizon H<sub>2</sub> puis les valeurs en Ni décroissent jusqu'à H<sub>4</sub>. Ce comportement est également observé à Bondoukou. Par contre, le nickel s'accumule en H<sub>3</sub>, à Guitry.

Le chrome croît de H<sub>1</sub> à H<sub>3</sub> sur le site de Korhogo, alors qu'à Bondoukou, il croît de H<sub>1</sub> à H<sub>2</sub> puis décroît jusqu'à H<sub>4</sub>. Au niveau de Guitry, Cr décroît de H<sub>1</sub> à H<sub>2</sub>, ensuite il commence à croître pour s'accumuler en H<sub>4</sub>.

Le plomb décroît de H<sub>1</sub> à H<sub>2</sub>, puis de H<sub>3</sub> à H<sub>4</sub>, avec les fortes valeurs en surfaces et les faibles valeurs en profondeur, à Korhogo. A Bondoukou, les concentration en Pb sont croissantes et s'accumulent en H<sub>4</sub>. Par contre, les valeurs sont croissantes de H<sub>1</sub> à H<sub>3</sub> et chutent en H<sub>4</sub>, à Guitry.

Le Cobalt se concentre à Korhogo dans, l'horizon H<sub>3</sub>, après une croissance de H<sub>1</sub> à H<sub>3</sub> Mais, à Bondoukou et à Guitry, les teneurs en Co sont préférentiellement accumulées en surface (horizon H<sub>1</sub>), les valeurs y sont décroissantes en fonction de la profondeur.

Les teneurs en cadmium dans le profil évoluent de la même manière à Korhogo et à Guitry, au contraire de l'évolution des teneurs observée à Bondoukou.

En ce qui concerne le cuivre, l'accumulation est marquée dans l'horizon H<sub>3</sub>, à Korhogo. Alors que les valeurs élevées s'observent dans l'horizon le plus profond (H<sub>4</sub>), à Bondoukou et à Guitry.

Pour le zinc, les valeurs fortes sont observées en surface (H<sub>1</sub>) à Korhogo, puis dans l'horizon H<sub>2</sub>, à Bondoukou, et ensuite dans l'horizon H<sub>3</sub>, à Guitry.

Tandis qu'à Korhogo les teneurs en manganèse sont décroissantes le long du profil, elles sont plutôt croissantes à Bondoukou. Mais à Guitry, les valeurs sont décroissantes de H<sub>1</sub> à H<sub>3</sub> puis baissent en H<sub>4</sub>

Les teneurs en fer croissent de H<sub>1</sub> à H<sub>3</sub> (zone d'accumulation) à Korhogo. Par contre, à Bondoukou et à Guitry, les teneurs en fer sont décroissantes. Elles se concentrent dans l'horizon H<sub>3</sub>, à Bondoukou et, dans l'horizon H<sub>4</sub>, à Guitry.

Le manganèse se concentre préférentiellement dans l'horizon de surface à Korhogo. Par contre, à Bondoukou et à Guitry, les fort taux sont observés en profondeur, respectivement, en H<sub>4</sub> et en H<sub>3</sub>.

#### **COMPARAISON DES ETM DANS LES COUCHES SUPERFICIELLES (0-60CM) DU SOL DES DIFFERENTES ZONES D'ETUDES**

La figure 4 présente 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 dans les différentes zones étudiées. Les teneurs moyennes des éléments les plus abondants tels que Fe et Mn dans les sols sont statistiquement comparables au seuil  $\alpha=0,05$ , selon le test de tukey. Les valeurs enregistrées à Guitry (43069 mg.kg<sup>-1</sup>) pour le fer sont relativement faibles par rapport aux deux autres sites (Bondoukou : 47246 mg.kg<sup>-1</sup>) et Korhogo : 47795 mg.kg<sup>-1</sup>) qui présentent des concentrations homogènes. En ce qui concerne le manganèse, nous observons une disparité des concentrations : 5006 mg.kg<sup>-1</sup> pour Bondoukou, 9469 mg.kg<sup>-1</sup> pour Korhogo et 13793 mg.kg<sup>-1</sup> à Guitry.

Des différences significatives s'observent également pour les teneurs en chrome et en cadmium. Pour le chrome, les valeurs à Korhogo et à Guitry sont comparables (28 et 27 mg.kg<sup>-1</sup>, respectivement) et sont inférieures à celles de Bondoukou (39 mg.kg<sup>-1</sup>).

La teneur en cadmium est, elle, décroissante, de Korhogo à Guitry, en passant par Bondoukou, avec les valeurs respectives de 0,6 ; 1 et 1,6 mg.kg<sup>-1</sup>.

Les autres éléments, à savoir : le zinc, le nickel, le cuivre, le plomb et le cobalt, 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'études. Les valeurs de Cu sont, pour Korhogo, Bondoukou et Guitry, respectivement, 158, 185 et 144 mg.kg<sup>-1</sup>. Les concentrations en Zn varient de 144 mg.kg<sup>-1</sup>, pour Korhogo, à 84 mg.kg<sup>-1</sup> pour Guitry, en passant par 110 mg.kg<sup>-1</sup> à Bondoukou. Les teneurs en Ni sont 24 mg.kg<sup>-1</sup> à Guitry, 28 mg.kg<sup>-1</sup> à Bondoukou et 29 mg.kg<sup>-1</sup> à Korhogo. Quant au plomb et au cobalt, leurs teneurs sont, respectivement, de l'ordre de 15, 13, 16 et 10, 12, 13 sur les sites de Korhogo, Bondoukou et Guitry.

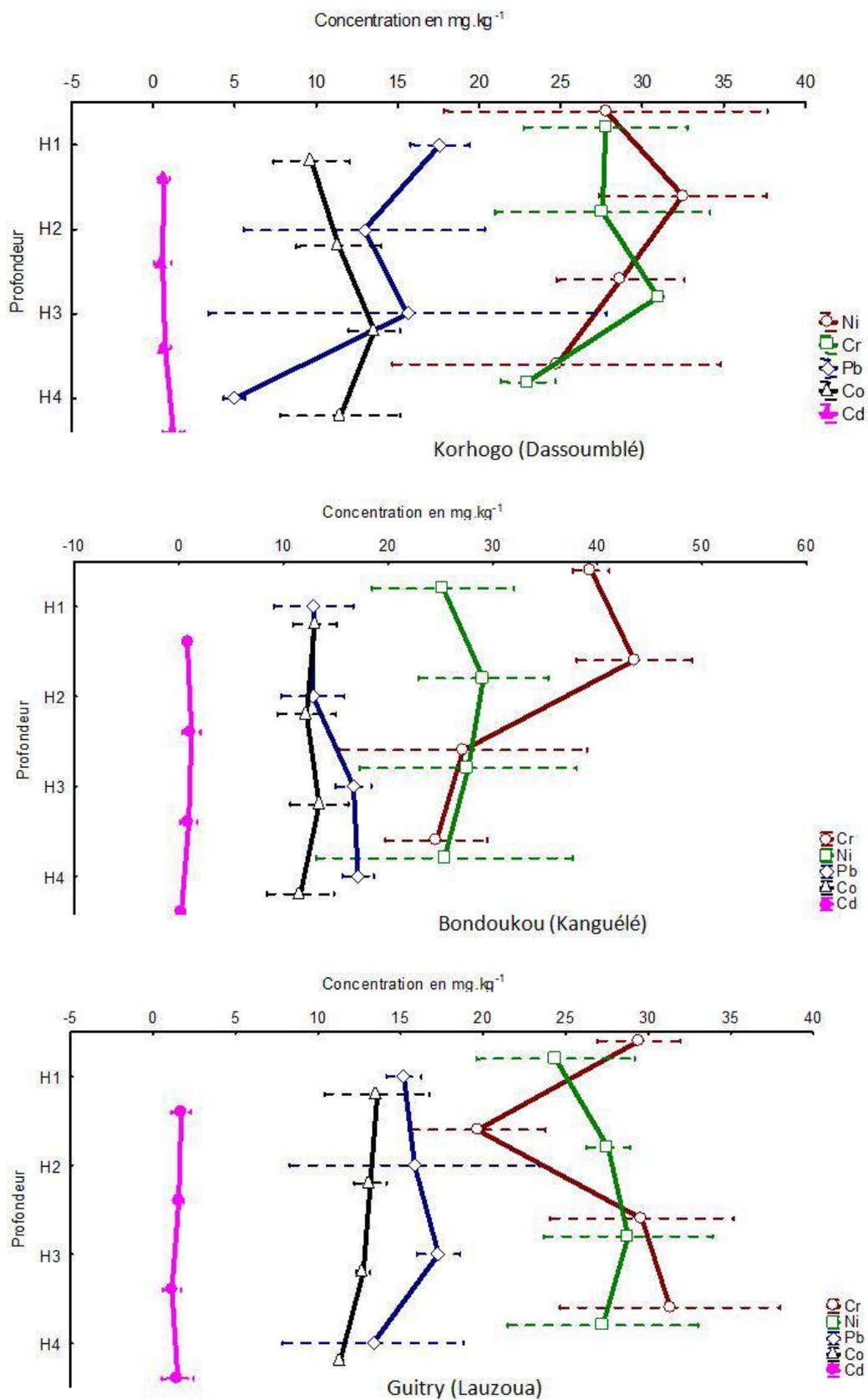


Fig. 1. Dynamique verticale du chrome, du nickel, du plomb, du cobalt et du cadmium dans les sols des différents sites étudiés

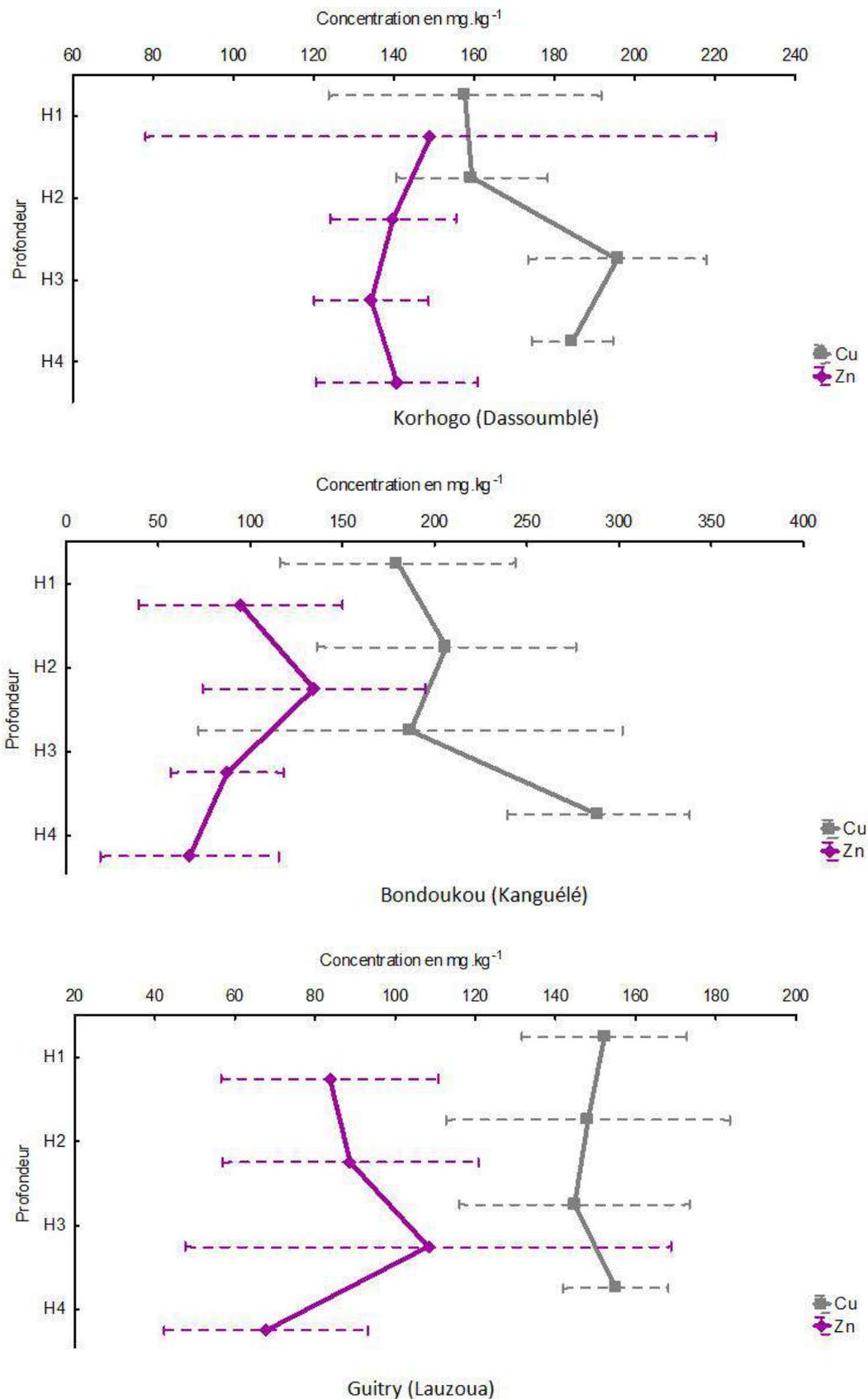


Fig. 2. Dynamique verticale du cuivre et du zinc dans les sols des différents sites étudiés

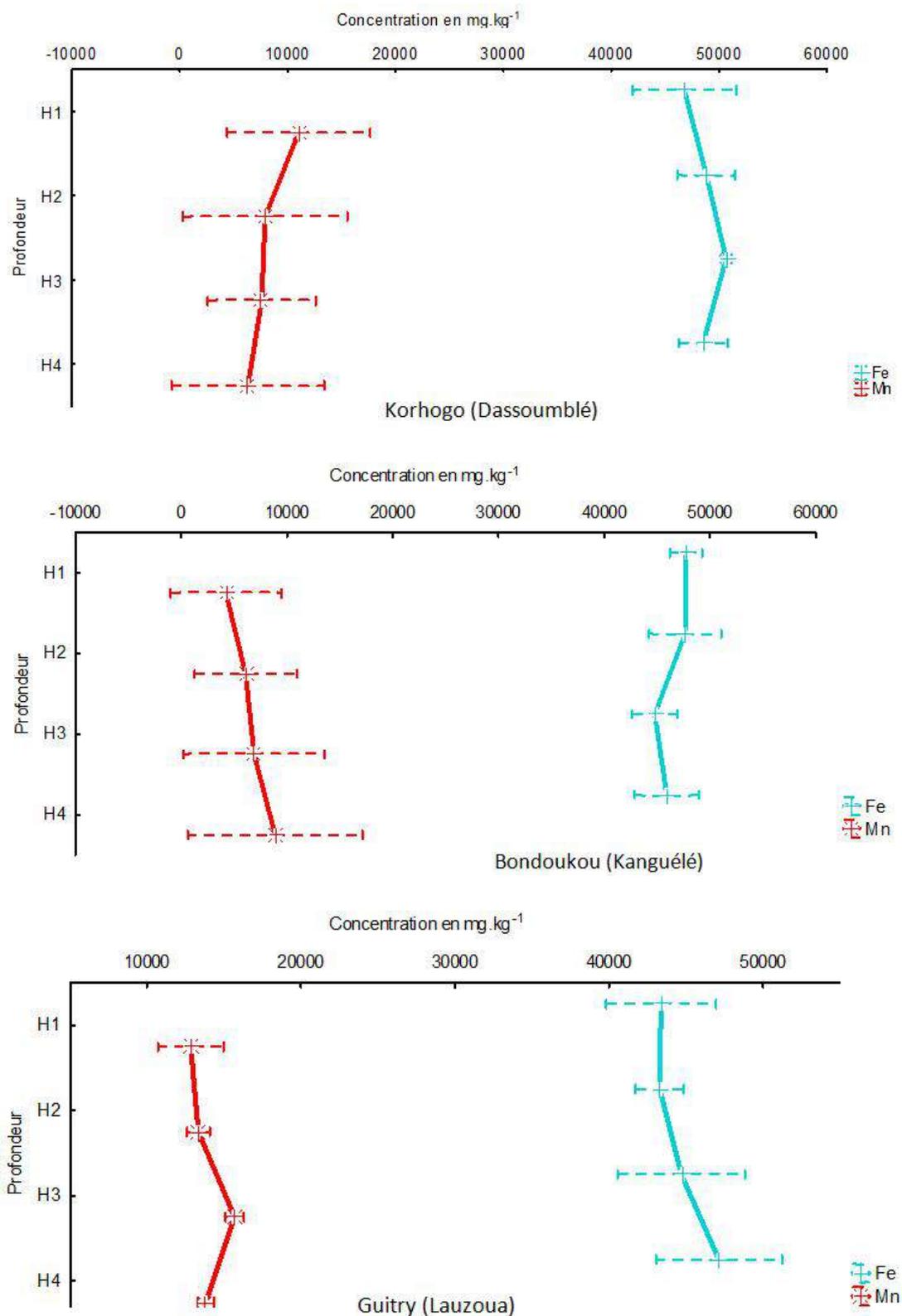


Fig. 3. Dynamique verticale du fer et du manganèse dans les sols des différents sites étudiés

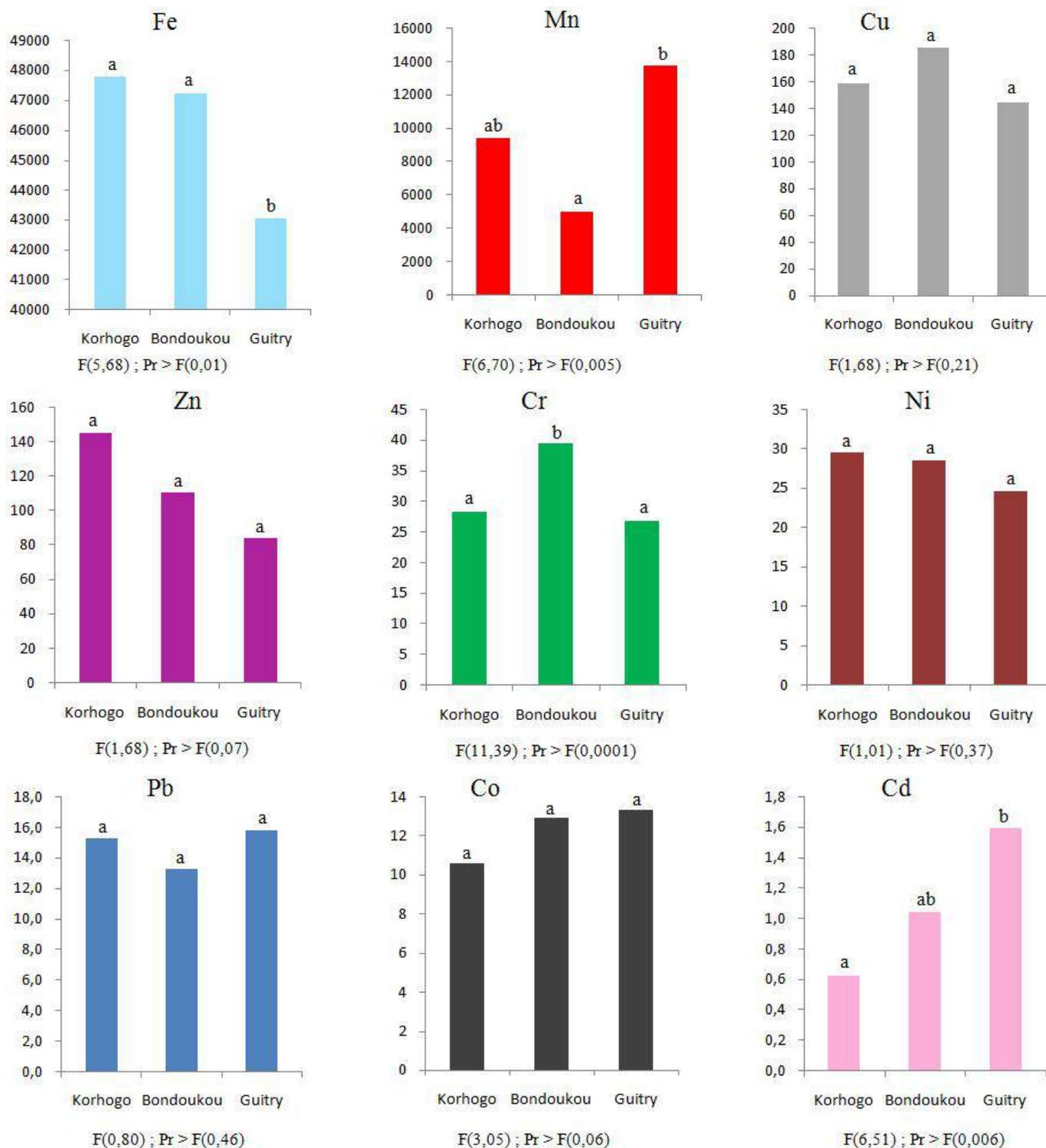


Fig. 4. Evolution des teneurs en ETM exprimées en mg.kg<sup>-1</sup> de la couche 0-60cm des sols en fonction des sites d'étude

#### 4 DISCUSSION

Les sols manganésifères des zones volcano-sédimentaires étudiés sont fortement pourvus en ETM, à l'instar des sols issus de matériaux volcaniques basaltiques décrits par plusieurs auteurs [13], [14] et [5].

Seuls le Pb, le Cr, le Ni et le Co, sur les sites étudiés, présentent des teneurs semblables à celles habituellement observées dans la plupart des sols du monde. Les teneurs en Cu, Zn, Cd, Mn et Fe se situent toutes dans la zone des teneurs critiques dans les sols, pouvant entraîner des phénomènes de toxicité, comme l'ont signalé [15] et [1] qui situent les teneurs critiques dans les sols, pour le manganèse, entre 1000 et 3000 mg.kg<sup>-1</sup>, pour le cuivre, entre 60 et 125 mg.kg<sup>-1</sup>, pour le zinc, entre 100 et 250 mg.kg<sup>-1</sup>, pour le cadmium, entre 0,7 et 2 mg.kg<sup>-1</sup>.

Certains ETM, à savoir : Fe, Ni et Co, présentent un coefficient de variation relativement faible (<25%). Les ETM à faible coefficient de variation ont une mobilité potentielle relativement lente [16]. A l'opposé, les éléments tels que Mn, Cd, Zn, Pb, Cr et Cu sont fortement variables, et donc faiblement retenus dans le sol, ce qui les rendrait plus labiles et biodisponibles [17].

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 ce qu'ont observé [18]. Les différences de concentrations observées entre les sites et les compartiments d'accumulation des ETM dans les sols pourraient être attribuées à une influence des processus pédologiques, combinés entre eux, sur la distribution de ces ETM. En effet, la pédogenèse implique des redistributions des composants du sol (carbonates, argiles, oxydes, matières organiques), souvent gouvernées par l'infiltration de l'eau, dans le profil de sol [19]. Les particules lessivées auront tendance à se redéposer en aval du profil, et donner naissance à des couches de sol aux propriétés modifiées. Ces couches de sol sont qualifiées, respectivement, d'horizons éluvial (ou lessivé) et d'horizons d'accumulation [20]. Les ETM associés aux composés ayant quitté le profil de sol, ou ayant migré au sein du profil subissent donc ainsi des enrichissements et des appauvrissements. Les ETM non associés aux matériaux lessivés, et résidant dans l'horizon supérieur se trouvent indirectement enrichis, suite au départ de matière depuis cet horizon, et, inversement, on peut observer un appauvrissement en éléments immobiles dans les horizons d'accumulation, par suite d'un important apport de matière. La lixiviation peut, elle aussi, conduire à l'appauvrissement des ETM des horizons de surface, car, la lame d'eau traversant les profils de sol a la capacité de mettre en solution les éléments les plus labiles, et les entraîner en profondeur [21]. Le départ des métaux en surface peut être compensé par leur accumulation partielle, plus en aval, dans le profil.

Les concentrations en ETM d'un sol subissant de la lixiviation des métaux et du lessivage doivent croître avec la profondeur, au moins jusqu'à l'horizon d'accumulation [22]. Cela est beaucoup plus marqué à Guîtres, où la majorité des ETM s'accumule dans l'horizon de profondeur. L'importance du lessivage et de la lixiviation dans la dynamique des ETM a été rapportée par de nombreux auteurs travaillant sur divers types de sol [23].

En faisant intervenir la notion de roche mère, [22] indique que les concentrations observées au niveau des horizons les plus profonds reflètent les occurrences naturelles des ETM dans les sols. Ainsi, les teneurs en ETM décroissantes vers les horizons de surface indiquent une source majoritairement naturelle, provenant de l'altération du matériau parental. L'accumulation d'ETM en surface a été constatée dans certaines zones étudiées, sans que l'on puisse parler de contamination. Il s'agit de Ni, Zn et Mn à Korhogo ; de Ni, Cr et Co à Bondoukou ; de Cr et Co à Guîtres. En revanche, les plus fortes concentrations d'ETM dans les horizons de surface reflètent l'affinité des ETM pour le carbone présent dans les horizons de surface [24]. Cela pourrait, en partie, expliquer la dynamique des ETM des sols étudiés ; laquelle dynamique serait donc influencée par plusieurs processus interagissant dans les sols manganifères développés sur des matériaux volcano-sédimentaires. La dynamique verticale reste donc très variable selon la zone.

Les ETM observés sont donc d'origine pédogénétique ; néanmoins, quelques contaminations ont été observées pour Pb, à Korhogo et pour Cd, à Bondoukou, après calcul des facteurs d'enrichissement. Toutefois, ces contaminations, attribuées aux activités agricoles [25], restent beaucoup négligeables.

L'exploitation des résultats de l'horizon 0-60cm montre l'existence d'un gradient Nord-Sud croissant d'accumulation, marqué pour Cd. L'inverse est observé pour Zn. Ces gradients pourraient être régis par l'action du climat. 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 sur les différentes zones étudiées.

Les pH franchement acides dans les sols manganésifères sont semblables à ceux observés sur d'autres sols manganésifères [4], [7]. Ces pH peuvent être responsable de la mise en solution des ETM et accroître leur mobilité [26]. Ces ETM pourraient ainsi entrer dans la chaîne alimentaire surtout que les zones étudiées sont à forte productivité agricole.

## 5 CONCLUSION

Les teneurs d'ETM observées dans les sols manganésifères de Côte d'Ivoire sont relativement fortes. L'ordre d'abondance de ces éléments est : Fe > Mn > Cu > Zn > Cr > Ni > Pb > Co > Cd. Parmi les teneurs en ETM obtenues dans ces sols, seules celles de Pb, Cr, Ni et Co sont habituelles. Les teneurs en Cu, Zn, Cd, Mn et Fe se situent dans la gamme des teneurs critiques dans les sols, pouvant entraîner des phénomènes de toxicité. Ces ETM coexistent en tant que constituants minéraux des sols. La dynamique verticale est très variable selon la zone, et reste essentiellement influencée par les processus pédogénétiques. L'accumulation d'ETM a été constatée dans certaines zones étudiées, sans que l'on puisse parler de contamination. Il s'agit de Ni, Zn et Mn à Korhogo ; de Ni, Cr et Co à Bondoukou ; de Cr et Co à Guitry. Les contaminations de Pb à Korhogo et de Cd à Bondoukou observées, ne sont pas alarmantes. L'exploitation des résultats de l'horizon 0-60 cm montre l'existence d'un gradient Nord-Sud croissant d'accumulation, marqué pour Cd. L'inverse est observé pour Zn. Mn est plus abondant à Guitry, mais faible à Bondoukou quand Cr apparaît plus important à Bondoukou. Les teneurs des autres ETM (Fe, Ni, Cu, Pb et Co) restent plus ou moins homogènes sur les différentes zones étudiées. Il serait donc intéressant de réaliser une étude sur la spéciation des éléments traces métalliques dans ces sols, afin de mieux prévenir d'éventuels risques de contamination vu les pH franchement acides.

## REFERENCES

- [1] G. Colinet, "Éléments traces métalliques dans les sols: contribution à la connaissance des déterminants de leur distribution spatiale en région limoneuse Belge," *Thèse de doctorat, FUSAGx, Gembloux*, 442p, 2003.
- [2] R.K. Rattan, S.P Datta, P.K. Chhonkar, K.Suribabu et A.K. Singh, "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), pp. 310-322, 2005.
- [3] M.L. N'diaye, A. Guey-Girardet et H-R. Pfeifer, "Impact des eaux usées sur l'évolution microbiologiques des sols: étude de cas à Pikine Dakar-Sénégal," *Agrosol*, Vol. 17 (1), pp. 33-38, 2006.
- [4] C.E Dowding. et M.V. Fey, "Morphological, chemical, and mineralogical properties of some manganese-rich oxisols derived from dolomite in Mpumalanga province, South Africa," *Geoderma* 141, pp. 23-33, 2007.
- [5] S. Manyà and M.A.H. Maboko, "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, pp. 152-160, 2008.
- [6] Brandt N. S., S. V. Rasskazov, V. K. Popov et S. B. Brandt, "Potassic Specifics of Basalts from the Sinii Utes Depression: Geochemical Correlations and Problems of K-Ar Dating (Southern Primorye Region)," *Russian Journal of Pacific Geology*, Vol. 3, No. 4, pp. 374-387, 2009.
- [7] R. R. Bourgault et M. C. Rabenhorst, "Genesis and characterization of manganeseiferous soils in the Eastern Piedmont, USA," *Geoderma*, 165, pp. 84-94, 2011.
- [8] Q. M. Jaradat, A. M. Massadeh, K. A. Momani, and M. A. Al Saleem, "The Spatial distribution of Pb, Cd, Zn, and Cu in Agricultural Roadside Soils", *Soil and Sediment Contamination*, 19, pp. 58-71, 2010.
- [9] S. Diatta, "Les sols gris de bas versant sur granite-gneis en region centrale de Côte d'Ivoire : organisation toposéquentielle et spatiale, fonctionnement hydrologique. Conséquence pour la riziculture", *Thèse unique, Université Henri point carré Nancy, France*, 181p, 1996.
- [10] W. Böhm, "In situ estimation of root length at natural soil profiles", *J. Agric. Sci.* 87, pp. 365-368, 1976.
- [11] G. W. Thomas, "Soil pH and soil acidity. In: Sparks D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods Part 3*," *Soil Science Society of America Inc, American Society of Agronomy, Inc Madison, Wisconsin, USA*, pp. 475-490, 1996.
- [12] F. Pimentel Gomes et C. H. Garcia, "Applied statistic to elementary agronomy and forestry", *Brasil : FEALQ*, 309 p, 2002.
- [13] A. J. Strieder, D.G. Roldão, and L.A. Hartmann, "The Palma Volcano-Sedimentary Supersuite, Precambrian Sul-Riograndense Shield, Brazil", *International Geology Review*, Vol. 42, pp. 984-999, 2000.
- [14] A. Bennoua, M. Ben Abbou, C. Hoepffner, M. L. Ribeiro, F. Kharbouch, J. F. Ramos, N. Youbi, Y. Driouch, M. Dahire et A. Ntarmouchant, "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, pp. 45-60, 2004.
- [15] N.K. Fageria, V.C. Baligar and R.B. Clark, "Micronutrients in crop production", *Adv. In Agronomy*, 77, pp. 185-268, 2002.
- [16] N.U. Benson, "Lead, Nickel, Vanadium, Cobalt, Copper and Manganese distribution in intensively cultivated floodplain Ultisol of cross river, Nigeria", *Intl. J. Soil Sci.*, 1 (2), pp. 140-145, 2006.
- [17] B J. Alloway, "Heavy metals in soils", *Blackie Academic & Professional. Glasgow*, 339p, 1990.

- [18] M. A. Tabatabai and N. P. Rogovska, "Trace Element Concentrations of Iowa Surface Soils", *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42, pp. 1153-1166, 2011.
- [19] J. Legros, "Les grands sols du monde", *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*, 574p, 2007.
- [20] AFES., "Référentiel Pédologique 1995", Baize D. et Girard M.C. (Coord.) - *INRA Éditions*, Paris, 332p, 1995.
- [21] D. Sparks, "Environmental soil chemistry", *Second Edition. San Diego*. 352p, 2003.
- [22] D. Baize, "Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols français. Références et Stratégies d'interprétation", *INRA Éditions*, Paris, 410p, 1997.
- [23] Z.O. Arby, A. Dekayir et M. El Maataoui, "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*, Vol.43, No.2, pp. 221-229, 2010.
- [24] L. Gaudois, "Dynamique et bilan des Eléments Traces Métalliques (ETM) dans des écosystèmes forestiers français Modélisation, Spéciation et Charges Critiques," *Thèse de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier*. Toulouse, France, 245 p, 2009.
- [25] S.M. Ross, "Toxic metals in soil-plant systems", *Wiley publishers, Chichester*, 469 p, 1994.
- [26] A. Kabata-Pendias et H. Pendias, "Trace elements in soils and plants," 3<sup>rd</sup> Ed, *Boca Raton, London, New York, CRC Press*, 413 p, 2001.

République de Côte d'Ivoire

UNION-DISCIPLINE-TRAVAIL

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique

Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody



UFR des Sciences de la Terre  
et des Ressources Minières



## PERMIS D'IMPRIMER

DOCTORAT UNIQUE EN SCIENCES DE LA TERRE

Présenté par Monsieur **KOUAKOU Yao Kouman Nestor**

**THEME : « Morphopédologie et pédogéochimie des sols développés sur matériaux volcano-sédimentaires au Blafo-Guéto (Toumodi) dans le Centre-sud de la Côte d'Ivoire».**

Vu et approuvé

Abidjan, le 11 novembre 2013

**Le Doyen**

**Prof. BOFFOUE Moro Olivier**



Vu et Permis d'Imprimer

Abidjan, le 11 novembre 2013

**Le Président de l'Université Félix  
Houphouët Boigny**



A handwritten signature in blue ink, likely belonging to the President of the University.