



Evaluation de la contamination métallique des sols exposés à l'incinération des pneus d'automobiles dans la ville de Ngaoundéré (Cameroun) Assessment of metal contamination of soils exposed to car tires burning in Ngaoundere (Cameroon)

L. Ekengele Nga^{1*}, S. Mabrey Sadjo¹, P. Zo'o Zame²

¹Faculté des Sciences, Université de Ngaoundéré, Cameroun

²Faculté des Sciences, Université de Yaoundé 1, Cameroun

Received 27 Apr 2016, Revised 10 Aug 2016, Accepted 26 Aug 2016

*Corresponding author. E-mail: ekengeleleo@yahoo.fr; Tél : (237) 677 72 06 56/(237) 698 23 18 83

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the metal contamination of soils exposed to the burning of car tires. Thus, 30 soil samples were collected in small wells and around them in three sites where the incineration activity takes place. The samples were analyzed by ICP-AES. The results show that the total concentrations of heavy metals in soils differ depending on the depth, the site and the metal considered. These elements vary (mg / kg) 37 730-59 920 for Fe; 105.70 to 28 060 for Zn; 9.48 to 257.10 for Ni; 4.88 to 291.90 for Cu; 41.65 to 521.50 for Cr; 1.92 to 208.50 for Pb and Cd ND ~ 5.23. The analyzes of heavy metals reveal that all these elements have high levels in the studied soils compared to the reference values used. To assess the level of contamination of the soils, the enrichment factor (EF) and the index of geo-accumulation (I_{geo}) were calculated. Thus, it was noted that with the exception of Ni whose enrichment is moderate, Cr, Cu, Pb, Cd present an EF that reaches the moderate to strong level of enrichment. Zn is the most enriched metal in soils with extreme EF and this is confirmed by (I_{geo}) which presents extreme contamination for that element. Detection in these soils of metals at very high level is a risk for the populations that consume plants grown on them.

Keywords: Ngaoundere, soils, car tires, heavy metals, contamination.

Résumé

Le but de la présente étude est d'évaluer la contamination métallique des sols exposés à l'incinération des pneus d'automobiles. Ainsi, 30 échantillons de sol ont été prélevés dans de petits puits et autour de ces derniers dans 3 sites où l'activité d'incinération se déroule. Les échantillons ont été analysés par ICP-AES. Les résultats obtenus montrent que les concentrations totales en métaux lourds dans les sols diffèrent en fonction de la profondeur d'échantillonnage, du site et du métal considéré. Ces concentrations (mg/kg) varient de 37 730 à 59 920 pour Fe ; 105,70 à 28 060 pour Zn ; 9,48 à 257,10 pour Ni ; 4,88 à 291,90 pour Cu ; 41,65 à 521,50 pour Cr ; 1,92 à 208,50 pour Pb et ND ~ 5,23 pour Cd. Les analyses révèlent que tous ces éléments ont des teneurs élevées dans les sols étudiés comparés aux valeurs de référence utilisées. Afin d'évaluer le niveau de contamination de ces sols, le facteur d'enrichissement (FE) et l'indice de géo-accumulation (I_{geo}) ont été calculés. Ainsi, il a été noté qu'à l'exception de Ni dont l'enrichissement est modéré, Cr, Cu, Pb, Cd présentent un FE qui atteint le niveau d'enrichissement modéré à fort. Le Zn est le métal le plus enrichi dans ces sols avec un FE extrême et ceci est confirmé par I_{geo} qui présente une contamination extrême pour cet élément. La détection dans ces sols des métaux à des teneurs très élevées est un risque pour les populations qui consomment des végétaux cultivés sur ceux-ci.

Mots clés: Ngaoundéré, sols, pneus d'automobiles, métaux lourds, contamination.

1. Introduction

La forte croissance démographique que connaissent les pays en voie de développement et leurs conditions économiques difficiles entraînent une urbanisation anarchique et incontrôlée. Cette situation est à l'origine du développement de diverses activités dont certaines polluent l'environnement. Cette pollution est souvent perceptible au niveau des sols, des eaux et de l'air, composantes dont dépend étroitement la vie de l'homme.

Le sol ne sert pas seulement de support sur lequel les plantes poussent, mais fournit également un habitat pour les animaux et les autres microorganismes [1]. Par conséquent, le sol constitue une partie vitale des ressources environnementales, écologiques et agricoles qui doit être protégée pour un développement durable et pour les générations futures [2]. Les recherches récentes ont montré que les sols dans différentes parties du monde particulièrement dans les zones urbaines et industrielles contiennent des concentrations énormément élevées de métaux lourds [3, 4]. Les travaux concernant les métaux lourds ont commencé à attirer l'attention des scientifiques à cause de leur non biodégradabilité, leur toxicité, leur persistance, et leur prévalence [5]. Les métaux lourds comptent parmi les polluants largement répandus provenant des activités anthropiques [6] et compte tenu du fait que ces éléments ne se dégradent pas, peuvent migrer et s'accumuler dans les différentes composantes des écosystèmes naturels et éventuellement être incorporés dans la chaîne alimentaire mettant ainsi en danger la santé des populations [7, 8, 9].

Certains métaux (Zn, Fe, Cu, Cr, Ni) sont des oligoéléments, donc indispensables pour l'homme, mais peuvent devenir toxique à forte concentration. D'autres (Pb, Cd) par contre, sont toxiques même à faible dose et n'ont aucune fonction métabolique connue dans l'organisme humain. Des travaux antérieurs [10 à 15] ont révélé que l'exposition à de fortes teneurs en zinc peut causer le nanisme chez les enfants, des troubles gastro-intestinaux et respiratoires, des modifications hématologiques, des lésions du foie, du pancréas et des reins ; la toxicité du fer peut provoquer des troubles digestifs parfois sévères ; l'ingestion de fortes doses de chrome est à l'origine des troubles hépatiques et rénaux sévères, des douleurs abdominales ; l'ingestion des doses élevées de cuivre peut causer la maladie de Wilson ainsi que des problèmes gastro-intestinaux ; la toxicité du nickel peut provoquer différents types de cancer à différents endroits du corps; le plomb est à l'origine des maladies cardiovasculaires, des troubles neurologiques, des atteintes rénales, du saturnisme chez les enfants et le cadmium provoque des problèmes rénaux et l'augmentation de la tension. L'exposition chronique au cadmium entraîne l'apparition d'une néphropathie irréversible pouvant évoluer vers une insuffisance rénale.

Le comportement des métaux lourds dans les sols dépend de plusieurs facteurs qui affectent leur dynamique à savoir le pH, la capacité d'échange cationique, la teneur en argile, la matière organique, d'où leur solubilisation et leur disponibilité pour les plantes [16, 17]. La pollution des sols par les métaux lourds est considérée comme une menace à long terme pour l'environnement [1].

Plusieurs études menées à travers le monde ont montré que la contamination des sols urbains par les métaux lourds émane des activités anthropiques [3 à 9]. C'est le cas de Ngaoundéré, capitale régionale de l'Adamaoua où la qualité des sols est menacée par plusieurs activités. Parmi celles-ci, l'incinération des pneus d'automobiles occupe une place non négligeable. Afin de récupérer les câbles métalliques, éléments essentiels pour les fabricants traditionnels de barbecues, les pneus d'automobiles sont incinérés à l'air libre, sur le sol, dans des conditions non contrôlées. Or, les produits émis (métaux lourds, hydrocarbures aromatiques polycycliques, aliphatiques) lors de cette combustion sont des polluants potentiels de l'air, de l'eau et du sol. Les données sur l'impact de la pollution métallique des sols urbains exposés à différentes activités anthropiques en général, et l'incinération des pneus d'automobiles en particulier sont rares à Ngaoundéré. Compte tenu de la fréquence et l'extension accrue de cette activité d'incinération, les risques de pollution des sols s'accroissent, ce qui pourrait avoir des impacts plus ou moins directs sur la population à plus ou moins long terme. Le but de la présente étude est d'évaluer le niveau de contamination métallique de ces sols exposés à l'incinération des pneus d'automobiles et son impact sur l'environnement. L'exploitation des résultats de la présente étude par les pouvoirs publics pourra conduire à l'interdiction formelle de cette activité d'incinération et épargner ainsi les populations qui cultivent sur ces sols, des risques d'intoxication à travers la chaîne alimentaire, risques pouvant nuire à leur santé.

2. Matériel et méthodes

2.1. Description de la zone d'étude

La ville de Ngaoundéré, chef-lieu de la région de l'Adamaoua, se situe entre 7°19,38' et 7°21,25' de latitude Nord et 13°33,40' et 13°35,51' de longitude Est. Ville carrefour dont la population est estimée à environ

300 000 habitants [18], Ngaoundéré est un important centre du commerce régional puisqu'il est un passage obligé du transport routier entre les villes du Sud du pays et les villes du grand Nord.

Les sols de Ngaoundéré appartiennent au grand groupe des sols ferrallitiques [19, 20, 21] et sont de trois types à savoir ceux formés sur basaltes anciens, ceux formés sur basaltes récents et ceux formés sur granites [20 à 24].

L'urbanisation anarchique de la ville de Ngaoundéré, l'accroissement démographique accéléré, la pratique non contrôlée de certaines activités et le manque d'infrastructures adéquates d'assainissement engendrent des rejets de polluants divers dans l'environnement, rejets qui sont susceptibles de contaminer les différentes composantes environnementales notamment les sols.

2.2. L'échantillonnage

Les travaux de terrain ont été réalisés dans trois sites de la ville (Figure 1) où l'activité d'incinération est plus intense et très fréquente (Figure 2) : Mazenod 1 (N 07,32690 ; E 013,57093), gare marchandise (N 07,32574 ; E 013,56986) et Mazenod 2 (N 07,34762 ; E 013,57250).

Un total de 30 échantillons a été collecté sur les trois sites dont 10 échantillons par site. Pour chaque site, une fosse d'environ 70 cm a été creusée au centre du foyer d'incinération et les échantillons étaient prélevés de la surface en profondeur à intervalle de 10 cm. Ce prélèvement permet d'apprécier la variation de la concentration des éléments avec la profondeur. Les échantillons au niveau de la fosse étaient numérotés de 1 à 7 de la surface vers le fond. Ensuite, 3 autres échantillons (8, 9, 10) étaient prélevés en surface (0 – 15 cm) autour du foyer afin de voir la variation des différents éléments en surface. A chaque point, 0,5 à 1 kg de sol était prélevé et conditionné dans un sachet plastique propre, bien étiqueté et amené au laboratoire.

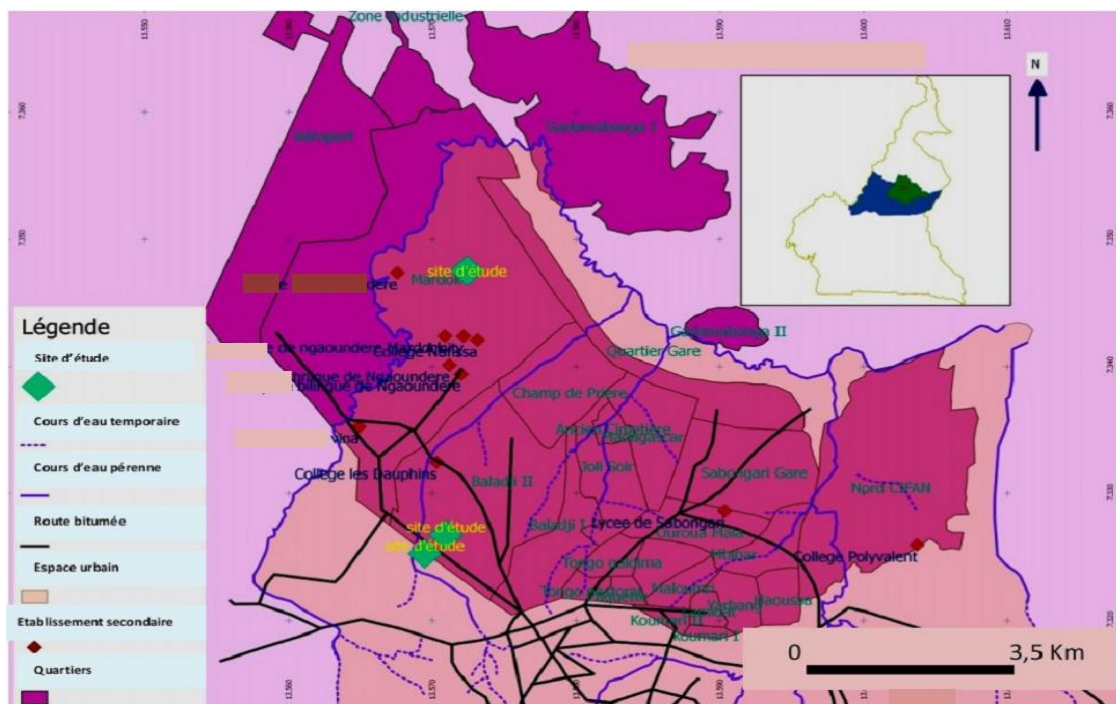


Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude. En encadré, la position de la région de l'Adamaoua au Cameroun

2.3. Préparation et analyse des échantillons

Les échantillons préalablement séchés à la température ambiante du laboratoire et au soleil étaient homogénéisés puis placés à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. Chaque échantillon était ensuite émotté et tamisé à l'aide d'un tamis de maille 2 mm. Le tamisât était broyé afin d'obtenir une poudre de granulométrie inférieure à 250 µm. La minéralisation a été réalisée avec 0,5 g d'échantillon par ajout de 6 ml d'acide chlorhydrique concentré à 35% et 2 ml d'acide nitrique concentré à 70% sur une plaque chauffante. Après refroidissement à l'air ambiant, le minéralisât est filtré à l'aide d'une membrane de cellulose sans cendre, ensuite ajusté à 50 ml avec de l'eau distillée et analysé à l'aide de ICP-AES (Perkins-Elmer Optima 3000XL) à l'Université de Sejong en Corée du Sud. L'analyse a porté principalement sur Fe, Zn, Ni, Cr, Cu, Pb et Cd.



Figure 2 : (a) Pneus en cours d'incinération et (b) Mise en place des pneus en vue de leur incinération

Trois paramètres physico-chimiques (matières organiques, pH et Conductivité) ont été mesurés au laboratoire de Génie Chimique et Environnement de l'Institut Universitaire des Technologies de l'Université de Ngaoundéré. La teneur en matière organique (MO) a été déterminée par la méthode de perte au feu (calcination au four) à partir de 10g d'échantillon de sol préalablement séché à l'étuve à 105°C pendant 24 heures, puis incinéré dans un four à 550°C pendant 2 heures [25]; le pH a été mesuré au moyen d'un pH-mètre de marque HANNA. La conductivité électrique a été mesurée à l'aide d'un conductimètre de marque CONSORT.

2.4. Estimation de l'intensité de la contamination

L'intensité de la contamination des sols par les métaux traces a été évaluée à partir de deux indices à savoir: le facteur d'enrichissement et l'index de géo-accumulation. Leur principe est fondé sur la comparaison des valeurs mesurées par rapport à des valeurs de référence telles que les moyennes des teneurs en éléments de la croûte terrestre (Average Shale).

2.4.1. Facteur d'enrichissement (FE)

Le facteur d'enrichissement fournit le nombre de fois qu'un élément est enrichi par rapport à l'abondance de cet élément dans le matériau de référence. Le matériau de référence utilisé dans cette étude est celui défini par Turekian et Wedepohl [26] et reconnu mondialement comme concentration de référence dans les zones non polluées.

Le calcul du FE a été défini en rapportant la teneur d'un élément contaminant de l'échantillon à la concentration d'un élément réputé relativement immobile de cet échantillon, comparé avec le même rapport trouvé dans le matériau de référence (Average shale). Le fer (Fe) a été choisi comme élément immobile de référence pour réaliser ce calcul. Ce choix repose sur le fait que le fer est naturellement présent dans les eaux et les sédiments de la zone d'étude. En plus, il fait partie des matériaux de référence largement utilisés dans la littérature [27, 28].

$$FE = \frac{[M]_{\text{éch}}/[Fe]_{\text{éch}}}{[M]_{\text{MR}}/[Fe]_{\text{MR}}}$$

Avec FE : Facteur d'enrichissement ; $[M]_{\text{éch}}$: concentration du métal M dans l'échantillon ; $[Fe]_{\text{éch}}$: concentration du fer dans l'échantillon ; $[M]_{\text{MR}}$: concentration du métal M dans les matériaux de référence (MR) ; $[Fe]_{\text{MR}}$: concentration du fer dans les matériaux de référence (MR).

Les valeurs du FE sont interprétées en fonction du niveau de contamination de Acevedo-Figueroa et al. dans Ekengele et al. [29] : $FE < 1$, pas d'enrichissement; 1~3, enrichissement faible ; 3~5, enrichissement

modéré ; 5~10, enrichissement modéré à fort ; 10~25, fort enrichissement ; 25~50, très fort enrichissement et FE > 50, enrichissement extrême.

2.4.2. Index de géo-accumulation ($I_{géo}$)

Un second critère pour évaluer l'intensité de la pollution métallique est l'index de géo-accumulation [30]. Cet index de caractère empirique compare une concentration donnée versus une valeur considérée comme fond géochimique [31].

$$I_{géo} = \log_2 (Cn/1,5Bn)$$

Où $I_{géo}$ = Index de géo-accumulation; \log_2 = logarithme de base 2; n = élément considéré; C = concentration mesurée dans l'échantillon; B = fond géochimique [33]; 1,5 = facteur d'exagération du fond géochimique, dont la fonction est de prendre en compte les fluctuations naturelles du fond géochimique. En outre, Müller [30] a défini une échelle de valeurs avec six classes en fonction de l'intensité de la pollution. Cette échelle stipule que : $I_{géo} < 0$ (classe 0), sans contamination ; 0~1 (1), sans à légère contamination ; 1~2 (2), contamination modérée ; 2~3 (3), contamination modérée à forte ; 3~4 (4), forte contamination ; 4~5 (5), Forte à extrême contamination et $I_{géo} > 5$ (6) traduit une contamination extrême.

2.4.3. Analyses statistiques

Afin de déterminer les différentes corrélations qui existent entre les métaux (Fe, Zn, Ni, Cu, Cr, Pb) étudiés d'une part et entre ces derniers et les paramètres physico-chimiques d'autre part, les matrices de corrélation de Pearson ont été établies.

3. Résultats et Discussion

3.1. Paramètres physico-chimiques

Les résultats du pH, de la conductivité électrique (CE) et de la matière organique (MO) sont présentés dans le tableau 1. Le pH dans les trois sites varie de 7,00 à 7,26 ; ce pH neutre varie peu d'un site à un autre et reflète la nature du sol. En effet, Segalen [32] a pu démontrer que le pH des sols ferrallitiques tend généralement vers la neutralité pour les horizons de surface. La variation du pH est le facteur dont l'action sur la mobilité des métaux est la plus déterminante. L'abaissement du pH favorise la mobilité des éléments traces métalliques (ETM), notamment par mise en solution de sels métalliques ou destruction de la phase de rétention. Inversement, l'augmentation du pH provoque l'immobilisation par formation de composés insolubles ou accroissement de la capacité d'échange cationique [33]. Bien plus, l'élévation du pH et la présence d'ions OH^- permet la formation d'hydroxydes métalliques insolubles limitant la migration des ETM tant vers la plante que vers la nappe phréatique et les eaux de surface [34].

La conductivité électrique ($\mu S/cm$) dans les trois sites varie de 732,33 à 1404,00 (tableau 1). Elle augmente avec la profondeur surtout dans les sites de Mazonod 1 et gare marchandise. La conductivité électrique d'un sol est l'aptitude de la solution de ce sol à conduire le courant électrique du fait du déplacement des ions qui y sont. Les fortes valeurs de conductivité obtenues dans le cadre de cette étude traduiraient une forte charge minérale dans ces sols, charge issue de l'activité d'incinération des pneus d'automobiles.

Les résultats ont aussi montré que la matière organique (%) varie de 0,91 à 7,10 (tableau 1). Elle est plus élevée dans les échantillons de surface (10 – 20 cm) et ceci s'explique par la présence de l'humus dans cet horizon de surface. Le site de Mazonod 2 présente à la fois, la valeur la plus élevée et la valeur la plus faible. Les résultats obtenus sont identiques à ceux de Segalen [32] qui signalait déjà une quantité assez modeste de MO pour les sols ferrallitiques. La présence de matière organique dans les sols est à l'origine de l'apparition de certaines propriétés physico-chimiques (masse volumique apparente du sol et teneur en eau par exemple) [43]. L'augmentation de ces teneurs s'accompagne d'une amélioration de la structure, de la facilité de l'infiltration de l'eau, de l'accroissement de la capacité de rétention en eau [44]. En outre, avec ses propriétés colloïdales, son caractère de substances fixatrices d'éléments et son pouvoir de chélation, la matière organique joue un rôle chimique important dans les sols: libération d'éléments nutritifs après minéralisation et augmentation de la capacité d'échange cationique [43].

Tableau 1: Concentrations (mg/kg) des métaux lourds, pH, CE et MO dans les sols de la zone d'étude

Echantillons	Fe	Zn	Ni	Cu	Cr	Pb	Cd	pH	CE (μ S/cm)	MO (%)
PSM 1	55 180	28 060	29,24	291,90	41,65	33,07	ND	7,18	758,33	4,95
PSM 2	44 820	17 580	43,20	157,70	130,40	164,50	ND	7,15	787,33	5,30
PSM 3	39 810	2534	15,65	23,93	73,42	39,68	ND	7,18	732,33	2,01
PSM 4	41 010	1759	24,39	9,86	95,50	15,67	ND	7,12	734,66	1,52
PSM 5	38 030	1266	12,67	6,51	63,91	9,46	ND	7,12	846,33	1,48
PSM 6	37 730	1078	12,94	6,61	65,53	8,53	ND	7,11	853,00	1,40
PSM 7	38 710	1213	14,74	7,97	71,30	9,39	ND	7,10	870,66	1,27
PSM 8	40 840	1609	12,83	23,34	66,56	32,98	ND	7,17	1048,00	3,13
PSM 9	40 520	1689	14,74	19,63	70,76	35,49	ND	7,12	1047,66	3,43
PSM 10	40 520	1157	13,65	17,44	68,15	33,26	ND	7,17	1266,00	2,84
Max	55 180	28 060	43,20	291,90	130,40	164,50	-	7,18	1266,00	5,30
Min	37 730	1078	12,67	6,51	41,65	8,53	-	7,10	732,33	1,27
Moyenne	41 717	5 795	19	853	75	38	-	7,14	894,43	2,73
DSM 1	48 210	15 220	17,10	87,21	90,07	208,50	5,23	7,18	1164,33	7,10
DSM 2	53 220	1526	25,48	8,72	143,00	36,04	ND	7,17	1255,33	1,62
DSM 3	59 920	719,80	10,79	6,63	176,70	18,25	ND	7,14	1196,33	0,91
DSM 4	55 570	798,20	12,24	6,90	146,90	16,63	ND	7,16	1144,33	1,43
DSM 5	44 690	904,50	13,65	6,73	82,65	9,09	ND	7,17	1120,33	1,11
DSM 6	41 310	842,10	11,57	6,50	57,28	8,21	ND	7,16	1136,33	1,37
DSM 7	42 040	716,20	17,72	7,70	73,46	7,46	ND	7,14	1173,66	2,01
DSM 8	53 030	1494	17,21	8,44	155,10	20,16	ND	7,11	1291,33	2,32
DSM 9	41 190	2260	15,58	18,67	74,85	22,48	ND	7,09	1215,00	3,45
DSM 10	53 570	1604	16,66	28,71	116,00	70,91	ND	7,16	1404,00	3,38
Max	59 920	15 220	25,48	87,21	176,70	208,50	5,23	7,18	1404,00	7,10
Min	41 190	716,20	10,79	6,50	57,28	7,46	-	7,09	1120,33	0,91
Moyenne	49 275	2608	16	19	112	42	-	7,15	1210,10	2,47
SGM 1	52 000	3757	17,52	17,50	190,60	11,83	ND	7,09	1160,00	3,85
SGM 2	58 900	12 800	19,45	156,50	129,90	30,67	ND	7,05	1060,33	3,41
SGM 3	43 040	1381	9,48	6,02	70,40	5,35	ND	7,07	1188,00	3,17
SGM 4	47 190	939,60	10,98	4,88	92,25	5,16	ND	7,09	1229,66	2,52
SGM 5	41 890	512,80	11,11	7,61	81,99	5,48	ND	7,24	1230,33	2,94
SGM 6	46 060	120,30	10,02	5,51	82,85	5,47	ND	7,18	1284,66	2,80
SGM 7	48 580	105,70	11,62	5,90	98,06	6,17	ND	7,26	1231,00	1,54
SGM 8	43 920	1446	12,46	5,03	78,85	3,64	ND	7,00	1104,00	1,67
SGM 9	46 810	603,10	10,83	5,38	92,05	1,92	ND	7,17	1172,00	1,59
SGM 10	49 460	1420	257,10	19,18	521,50	4,07	ND	7,02	1041,66	2,16
Max	58 900	12 800	257,10	156,50	521,50	30,67	-	7,26	1284,66	3,85
Min	41 890	105,70	9,48	4,88	70,40	1,92	-	7,00	1041,66	1,54
Moyenne	47 785	2309	37,05	23,35	143,84	7,98	-	7,12	1170,16	2,57
(1)	12,50-70	0,40-5,20	-	0,50-10,50	ND-8,70	5-182	ND-0,24	-	-	-
(2)	850-12500	18,6-1163,7	-	20-369,7	27,7-125	10,3-1500	1-11,5	-	-	-
(3)	-	74,55-144,45	27,6-46,65	22,35-49,2	190,3-667,5	7,15-36,55	5,65-9,5	-	-	-

(4)	-	20,12	5,16	10,91	5,25	29,66	0,21			
(5)	-	61,51- 12220	8,67- 50,71	8,24- 228,30	26,26- 71,11	8,91- 779,91	0,23- 1,79			
(6)	-	300	50	100	150	100	2			
(7)	-	90	50	30	70	35	0,35			
(8)	46700	95	68	45	90	20	0,3			

PSM : Premier site Mazenod ; DSM : Deuxième site Mazenod ; SGM : site gare marchandise ; ND : Non Déterminé

(1) Heavy metal concentrations (mg/kg) in soil samples around the battery factory [35] ; (2) Concentrations (ppm) des métaux lourds du sol de la décharge d'Akouédo [36] ; (3) Concentrations métalliques des sols agricoles de la ville de Kenitra [37] ; (4) Concentrations moyennes (mg/kg) de métaux lourds dans les sols agricoles de Settât [38] ; (5) Concentrations des éléments traces métalliques (mg/kg) dans les sols de Niamey [39] ; (6) Valeurs de référence relatives à un sol [40] ; (7) Concentrations métalliques dans un sol normal [41] ; (8) Répartition des éléments dans les schistes (average shale) [42].

3.2 Les teneurs en métaux lourds des sols exposés à l'incinération des pneus

Le tableau 1 présente les résultats des teneurs des métaux lourds dans les sols exposés à l'incinération des pneus d'automobiles dans la ville de Ngaoundéré. De ces résultats, il ressort que les concentrations (mg/kg) des métaux lourds dans les trois sites étudiés varient comme suit : Fe : 37 730 ~ 59 920 ; Zn : 105,70 ~ 28 060 ; Ni : 9,48 ~ 257,10 ; Cu : 4,88 ~ 291,90 ; Cr : 41,65 ~ 521,50 ; Pb : 1,92 ~ 208,50 et Cd : ND ~ 5,23. L'étude a révélé que tous les éléments analysés se concentrent dans les vingt premiers centimètres du sol où la matière organique présente des teneurs élevées. Kouame et al. [36] avaient déjà signalé que les métaux ont toujours tendance à s'accumuler dans les horizons de surface riches en matières organiques. En effet, au niveau de la matière organique, la charge des substances humiques est toujours négative ou nulle, d'intensité variable suivant le pH du milieu et provient de la dissociation des groupements fonctionnels [45]. Ce sont donc ces groupements fonctionnels carboxyliques (COOH), phénolique et/ou alcooliques (OH), carbonyles (C=O) et aminés (NH₂) qui sont fortement impliqués dans la complexation des cations métalliques [36]. Les échantillons récoltés à la surface de part et d'autres des puits (8, 9, 10) présentent aussi des valeurs élevées en éléments (Fe, Cu, Pb) et en MO.

D'une manière générale, il est à remarquer que la plupart des métaux lourds étudiés se concentrent plus en surface qu'en profondeur. Kao et al. [38] ont obtenu des résultats similaires dans le cadre de leur étude portant sur la pollution métallique dans les sols agricoles irrigués par les eaux usées de la ville de Settât (Maroc).

Les plus fortes concentrations ont été observées dans les puits, particulièrement au centre des foyers d'incinération traduisant ainsi l'apport de cette activité en métaux lourds au sol. Les fortes teneurs en zinc et cuivre ont été enregistrées dans le premier site de Mazenod (PSM), le fer, le plomb, le cadmium dans le deuxième site de Mazenod (DSM) tandis que le nickel et le chrome ont présenté des valeurs fortes dans le site de la gare marchandise (SGM). Le nickel et le chrome sont les seuls qui ont présenté des fortes teneurs dans les échantillons de sol récoltés à la surface autour du foyer d'incinération. La prédominance de la concentration d'un métal est fonction du site mais d'une manière générale sur les différents sites étudiés, la séquence des teneurs en ETM dans ces sols est Fe > Zn > Cr > Cu > Ni > Pb > Cd. Ce résultat suggère que la contamination du sol dépend à la fois de la fréquence de l'activité d'incinération et aussi de l'intensité de cette activité.

Ces métaux constituent ainsi une menace pour les eaux de surface par lessivage et pour la nappe phréatique par risque de migration sous-jacent. Bien plus, Les fortes teneurs en éléments traces métalliques détectées dans ces sols constituent un risque pour une éventuelle contamination des végétaux cultivés dans cette zone et un éventuel transfert dans la chaîne alimentaire pouvant ainsi mettre en danger la santé du fait que ces végétaux sont utilisés pour l'alimentation de la population de la ville de Ngaoundéré.

Le tableau 2 présente les teneurs en substances chimiques contenues dans les pneus d'automobiles [46]. De l'analyse de ce tableau, il ressort que tous les éléments étudiés dans le présent travail entrent dans la constitution d'un pneu.

Les concentrations moyennes de Fe dans les échantillons de sol des trois sites varient (mg/kg) de 41 717 à 49 275. Le deuxième site de Mazenod (DSM) est le plus concentré en cet élément et le premier site de Mazenod (PSM) est le moins concentré. Ceci peut s'expliquer par la fréquence d'incinération dans ce site (DSM) que dans les autres qui sont moins sollicités. Certaines teneurs en Fe obtenues dans ce travail sont au-dessus de la teneur moyenne de référence (average shale) de Turekian et Wedepohl [42]. Toutes les concentrations en Fe de la présente étude sont au-dessus de celles signalées par Olaoye et al. [35] sur des sols

autour d'une usine de batteries au Nigéria et par Kouame et al. [36] sur les sols de la décharge d'Akouédo en Côte d'Ivoire. Quoique les sols ferrallitiques soient riches en fer de par leur nature, une partie de cet élément pourrait aussi provenir de l'incinération des pneus qui renferme entre autres, des éléments ferreux dans leur constitution. Garba et al. [47] signalaient déjà la présence de cet élément dans toutes les voitures y compris les roues.

Tableau 2 : Substances chimiques contenues dans les pneus usagés de voiture [46]

Eléments	Teneurs
Carbone	~ 70%
Fer	16%
Hydrogène	7%
Oxygène	4%
Oxyde de zinc	1%
Soufre	1%
Azote	0,5%
Acide stéarique	0,3%
Halogènes	0,1%
Liaisons cuprifères	200 mg/kg
Cadmium	10 mg/kg
Chrome	90 mg/kg
Nickel	80 mg/kg
Plomb	50 mg/kg

Le zinc est le second élément après Fe dont les teneurs sont élevées dans la zone d'étude. Le premier site de Mazenod (PSM) présente la teneur la plus élevée tandis que le site de la gare marchandise SGM présente la teneur la moins élevée. Les différentes variations en concentrations observées dans les trois sites sont le fait de l'intensité de cette activité d'incinération, étant donné que les sites PSM et DSM sont plus fréquentés car situés en pleine ville alors que le site SGM est en périphérie. Les résultats de la présente étude sont supérieurs aux valeurs de référence (average shale) [42] et aux teneurs des métaux lourds dans un sol normal [41]. Ces teneurs en zinc sont également supérieures à celles obtenues dans la littérature [35 à 42] traitant de la concentration des métaux lourds dans les sols issus de différentes activités anthropiques. Par ailleurs, Tankari et al. [39] ont obtenu des valeurs similaires à celles de la gare marchandise, dans des échantillons de sol de la ville de Niamey (Niger). En fait, l'étude concernait des sites situés à proximité des sources de pollution à savoir des décharges publiques à ciel ouvert, des activités agricoles, trafic routier ou des activités informelles (incinération des déchets, brûlage de pneus, cuissons diverses, eaux usées, etc.). Donc les teneurs élevées en Zn de la présente étude sont imputables à l'incinération des pneus d'automobiles.

Les concentrations maximale et minimale en nickel ont été observées dans le site de la gare marchandise. A l'exception de SGM et particulièrement l'échantillon SGM 10 prélevé en surface autour de la fosse, les teneurs maximales enregistrées dans la présente étude sont inférieures à celles de Turekian et Wedepohl [42] considérées comme valeurs de références et celles de Bowen [41] pour des sols normaux. Ces valeurs maximales sont aussi inférieures à toutes celles citées dans la littérature [35 à 42]. La valeur élevée en SGM 10 serait le fait d'un événement ponctuel qui aurait enrichi le sol en cet élément étant donné que le site est sujet à une anthropisation poussée.

La teneur maximale du cuivre a été observée dans le premier site de Mazenod alors que le site de la gare marchandise présentait la valeur la plus faible. Dans la présente étude, les vingt premiers centimètres du sol ont révélé des concentrations en Cu supérieures aux valeurs de références de Bowen [41] et de Turekian et Wedepohl [42]. Seuls les sites PSM et SGM ont montré des valeurs maximales au-dessus des valeurs de référence relatives à un sol de Baize [40]. Les fortes valeurs en Cu enregistrées à la surface du sol sont une indication que cet élément fait partie des différentes composantes d'un pneu. Il a été constaté que le cuivre se fixe préférentiellement sur la matière organique et c'est un élément qui migre peu sauf dans des conditions de mauvais drainage ou en milieu très acide [33].

La concentration maximale en Cr a été notée dans le site de la gare marchandise et la petite valeur dans le premier site de Mazenod. Les teneurs maximales en Cr de la présente étude sont au-dessus des valeurs de

référence [41, 42] à l'exception du PSM dont la concentration maximale est inférieure à la valeur de référence de Baize [40]. Les teneurs dans les trois sites sont inférieures à la concentration maximale obtenue par Nabil et al. [37] dans les sols agricoles de la ville de Kenitra (Maroc). A l'exception de l'échantillon SGM 10 du site de la gare marchandise qui a présenté une valeur exceptionnelle de 521,50 mg/kg, les fortes teneurs en chrome se trouvent dans les premiers centimètres de la surface du sol. Ceci traduit certainement que cet élément est plus ou moins mêlé dans la composition des pneus d'automobiles. La valeur observée dans l'échantillon SGM 10 serait le fait d'un événement ponctuel par la présence d'une activité qui aurait enrichi le sol en Cr.

Le deuxième site de Mazenod a affiché la concentration maximale en plomb alors que celui de la gare marchandise a révélé la plus petite concentration. A l'exception de SGM, les autres sites ont présenté des valeurs au-dessus des références [40, 41, 42]. Mais les teneurs de la présente étude sont inférieures à celles obtenues par Kouame et al. [36] dans la décharge d'Akouédo et par Tankari et al. [39] dans les sols de Niamey. Les concentrations de plomb rencontrées dans les échantillons de surface (10-20 cm) sont liées à l'activité d'incinération des pneus.

Le cadmium n'a été détecté que dans un échantillon de surface du deuxième site de Mazenod (DSM 1). Cette valeur est au-dessus des teneurs de référence [40, 41, 42], mais inférieures à celles obtenues par Kouame et al. [43] dans la décharge d'Akouédo et de Nabil et al. [37] dans les sols agricoles de Kenitra. La présence de cet élément dans le seul échantillon de ce site est étroitement liée à la teneur en MO qui est la plus élevée dans cette étude. Il est connu que le cadmium est plus facilement retenu par les hydroxydes de fer et par la matière organique [33]. L'absence de Cd dans les autres sites serait due soit au lessivage de cet élément qui est assez mobile ou alors à la qualité et la quantité des pneus incinérés dans ces sites étant donné que le DSM est plus fréquenté que les autres sites.

En général, les fortes concentrations en ETM observées dans les différents sites en plus d'être influencées par la MO, pourraient aussi être reliées au pH des sols qui est neutre. A un tel pH, la plupart des métaux traces se retrouvent dans les sols sous forme d'oxydes et donc fixés à la phase solide du sol [48]. A cela il faudrait ajouter le fait que les pneus sont incinérés à maintes reprises et au même endroit sur le même sol. Ceci constituerait un effet cumulatif des métaux dans le même site.

3.2.1 Facteur d'enrichissement

Le facteur d'enrichissement est un outil qui permet de voir si les concentrations des métaux lourds obtenues dans les sols sont d'origine anthropique ou naturelle. Les résultats du facteur d'enrichissement des sols de la zone d'étude sont présentés dans le tableau 3. Ces résultats révèlent que Ni varie d'un enrichissement nul à un enrichissement modéré. Cr, Cu et Pb varient d'un enrichissement nul à un enrichissement modéré à fort. Cd qui n'a été détecté que dans un site présente un fort enrichissement tandis que Zn varie d'un enrichissement faible à un enrichissement extrême. L'étude fait noter que les échantillons de sol prélevés en surface et proche de la surface dans la fosse ou autour de ce dernier sont plus enrichis en métaux lourds que ceux qui sont prélevés en profondeur. A l'exception du nickel dont l'enrichissement est modéré, tous les autres éléments présentent un FE qui va de modéré à fort à extrême ce qui traduit la forte charge anthropique de ces métaux dans la zone. Ceci corrobore avec la constitution chimique des pneus d'automobiles [46] et confirme que leur incinération libère des métaux dans le sol.

3.2.2 Index de géo accumulation

Les résultats de l' I_{geo} sont présentés dans le tableau 4. Ni et Cr varie d'une contamination nulle à modérée. Cu et Pb varient d'une contamination nulle à une contamination modérée à forte. Cd détecté dans un seul échantillon, présente une forte contamination. Enfin, Zn présente une contamination extrême. Les résultats de l' I_{geo} confortent ceux du FE dans la présente étude. Ainsi, la contamination par les métaux lourds notée est étroitement liée à l'activité d'incinération des pneus d'automobiles.

3.3 Corrélations entre les métaux lourds et les paramètres physico-chimiques dans les sols

Les tableaux 5, 6 et 7 présentent les matrices de corrélation de Pearson entre les métaux lourds étudiés et les paramètres physico-chimiques des sols des trois sites d'étude. L'analyse de ces matrices permet de noter des corrélations ($P < 0,05$) très significatives et positives entre Fe/Zn dans PSM ; entre Cd/Zn, Pb/Cu, Cu/Zn, Cu/MO, Pb/Zn, Cd/Cu, Pb/Cd, Pb/MO, Zn/MO et Cr/Fe dans DSM et entre Cr/Ni, Cu/Zn, Pb/Zn, Cu/Pb dans SGM. Des corrélations significatives et positives sont observées entre Ni/Pb, Zn/MO dans PSM ; entre Cd/MO

dans DSM et entre Fe/Pb, Fe/Zn, Fe/Cu dans SGM. Enfin des corrélations modérément significatives et positives ont été enregistrées entre Cr/Pb, Fe/MO, Ni/Zn, Pb/MO, Ni/MO, Ni/Cr, Ni/Fe, pH/MO et Fe/pH dans PSM ; entre CE/pH, Pb/MO, Zn/MO dans SGM. Par ailleurs, SGM a révélé des corrélations modérément significatives et négatives entre CE/Fe, CE/Ni, CE/Zn, CE/Cu et CE/Cr.

Tableau 3: FE des échantillons de sol dans les trois sites d'étude

Echantillons	FE Zn	FE Ni	FE Cu	FE Cr	FE Pb	FE Cd
PSM 1	254,26	0,35	5,51	0,40	1,39	-
PSM 2	196,12	0,64	3,67	1,53	8,54	-
PSM 3	31,83	0,26	0,63	0,97	2,32	-
PSM 4	21,45	0,40	0,25	1,23	0,89	-
PSM 5	16,64	0,22	0,18	0,88	0,58	-
PSM 6	14,29	0,23	0,18	0,91	0,53	-
PSM 7	15,67	0,25	0,21	0,97	0,56	-
PSM 8	19,70	0,21	0,60	0,86	1,88	-
PSM 9	20,84	0,24	0,50	0,92	2,04	-
PSM 10	14,28	0,22	0,45	0,89	1,91	-
DSM 1	157,85	0,24	1,88	0,98	10,06	18,08
DSM 2	14,34	0,32	0,17	1,41	1,57	-
DSM 3	6,01	0,12	0,12	1,55	0,71	-
DSM 4	7,18	0,15	0,13	1,39	0,70	-
DSM 5	10,12	0,20	0,16	0,97	0,47	-
DSM 6	10,19	0,19	0,16	0,73	0,46	-
DSM 7	8,52	0,28	0,19	0,92	0,41	-
DSM 8	14,09	0,22	0,17	1,54	0,88	-
DSM 9	27,43	0,25	0,47	0,96	1,27	-
DSM 10	14,97	0,21	0,56	1,14	3,08	-
SGM 1	36,13	0,22	0,35	1,9	0,53	-
SGM 2	108,66	0,22	2,77	1,16	1,21	-
SGM 3	16,04	0,15	0,15	0,86	0,29	-
SGM 4	9,96	0,16	0,11	1,03	0,25	-
SGM 5	6,12	0,18	0,19	1,03	0,30	-
SGM 6	1,31	0,15	0,12	0,95	0,28	-
SGM 7	1,09	0,16	0,13	1,06	0,30	-
SGM 8	16,46	0,19	0,12	0,94	0,19	-
SGM 9	6,44	0,15	0,12	1,03	0,10	-
SGM 10	14,36	3,47	0,40	5,55	0,19	-

Tableau 4: $I_{géo}$ des échantillons de sol dans les trois sites d'étude

Echantillons	$I_{géo}$ Zn	$I_{géo}$ Ni	$I_{géo}$ Cu	$I_{géo}$ Cr	$I_{géo}$ Pb	$I_{géo}$ Cd
PSM1	7,62	-1,35	2,11	-1,69	0,14	-
PSM2	6,94	-0,79	1,22	-0,05	2,45	-
PSM3	4,15	-2,26	-1,49	-0,87	0,40	-
PSM4	3,62	-1,62	-2,77	-0,49	-0,93	-
PSM5	3,15	-2,56	-3,37	-1,07	-1,66	-
PSM6	2,91	-2,53	-3,35	-1,04	-1,81	-
PSM7	3,08	-2,34	6,88	-0,92	-1,67	-
PSM8	3,49	-2,54	-1,53	-1,02	0,13	-
PSM9	3,56	-2,34	-1,78	-0,93	0,24	-
PSM10	3,02	-2,45	-1,95	-0,98	0,14	-
DSM1	6,73	-2,13	0,36	-0,58	2,79	3,53
DSM2	3,42	-1,55	-2,95	0,08	0,26	-
DSM3	2,33	-2,79	-3,34	0,38	-0,71	-
DSM4	2,48	-2,61	-3,28	0,12	-0,85	-
DSM5	2,66	-2,45	-3,32	-0,70	-1,72	-
DSM6	2,56	-2,69	-3,37	-1,23	-1,86	-
DSM7	2,32	-2,08	-3,13	-0,87	-2,06	-
DSM8	3,39	-2,12	-2,99	0,20	-0,57	-
DSM9	3,98	-2,26	-1,85	-0,85	-0,41	-
DSM10	3,49	-2,17	-1,23	-0,21	1,24	-
SGM1	4,72	-2,09	-1,94	0,49	-1,34	-
SGM2	6,48	-1,94	1,21	-0,05	0,03	-
SGM3	3,27	-2,98	-3,48	-0,93	-2,48	-
SGM4	2,72	-2,77	-3,78	-0,54	-2,53	-
SGM5	1,84	-2,75	-3,14	-0,71	-2,45	-
SGM6	-0,24	-2,90	-3,61	-0,70	-2,45	-
SGM7	-0,43	-2,69	-3,51	-0,46	-2,27	-
SGM8	3,34	-2,58	-3,74	-0,77	-3,04	-
SGM9	2,08	-2,79	-3,64	-0,55	-3,95	-
SGM10	3,31	1,77	-1,81	1,94	-2,87	-

Les fortes corrélations notées permettent de dire que ces paramètres sont gouvernés par le même mécanisme. Ce mécanisme pourrait être l'adsorption qui entraîne une rétention des métaux lourds sur la matière organique. D'autre part, les corrélations positives et significatives entre les différents métaux lourds traduisent une source commune qui est la structure des pneus d'automobiles.

Tableau 5 : Matrice de corrélation (Pearson) du sol du premier site de Mazenod

Variables	MO	pH	CE	Fe	Ni	Zn	Cu	Cr	Pb
MO	1								
pH	0,60	1							
CE	0,03	0,11	1						
Fe	0,77	0,58	-0,26	1					
Ni	0,72	0,27	-0,46	0,63	1				
Zn	0,81	0,49	-0,38	0,95	0,76	1			
Cu	-0,32	-0,48	-0,06	-0,17	-0,13	-0,13	1		
Cr	0,22	-0,11	-0,21	-0,16	0,64	0,01	-0,05	1	
Pb	0,73	0,33	-0,12	0,31	0,82	0,49	-0,20	0,77	1

Corrélations significatives à $P < 0,05$

Tableau 6: Matrice de corrélation (Pearson) du sol du deuxième site de Mazenod

Variables	MO	pH	CE	Fe	Ni	Zn	Cu	Cr	Pb
MO	1								
pH	0,11	1							
CE	0,15	-0,23	1						
Fe	-0,15	0,17	0,38	1					
Ni	0,23	0,10	0,42	0,06	1				
Zn	0,91	0,35	-0,11	-0,07	0,15	1			
Cu	0,96	0,34	0,04	-0,05	0,15	0,97	1		
Cr	-0,27	-0,03	0,35	0,95	0,07	-0,18	-0,20	1	
Pb	0,92	0,42	0,09	0,06	0,21	0,96	0,98	-0,09	1

Corrélations significatives à $P < 0,05$

Tableau 7: Matrice de corrélation (Pearson) du sol du site de la gare marchandise

Variables	MO	pH	CE	Fe	Ni	Zn	Cu	Cr	Pb
MO	1								
pH	-0,16	1							
CE	-0,01	0,74	1						
Fe	0,33	-0,26	-0,51	1					
Ni	-0,15	-0,38	-0,59	0,15	1				
Zn	0,50	-0,39	-0,57	0,84	-0,04	1			
Cu	0,40	-0,29	-0,54	0,82	0,02	0,97	1		
Cr	-0,02	-0,39	-0,62	0,29	0,97	0,04	0,06	1	
Pb	0,56	-0,22	-0,41	0,84	-0,12	0,97	0,96	-0,02	1

Corrélations significatives à $P < 0,05$

Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'évaluer le niveau de contamination métallique des sols exposés à l'incinération des pneus d'automobiles dans la ville de Ngaoundéré. Les résultats obtenus montrent que tous les métaux lourds détectés (Fe, Zn, Ni, Cu, Cr, Pb et Cd) ont un lien étroit avec les constituants des pneus. Tous ces éléments ont présenté à certains niveaux, des teneurs plus élevées que les valeurs de référence. La séquence générale des teneurs en éléments métalliques de ces sols est $Fe > Zn > Cr > Cu > Ni > Pb > Cd$. Les métaux ont été trouvés concentrés dans les vingt premiers centimètres de la surface. Quoique tous les éléments aient atteint un enrichissement modéré à fort à l'exception du Ni, le zinc a présenté un enrichissement extrême confirmé par l' I_{geo} dont la contamination est aussi extrême pour cet élément. La contamination de ces sols est d'une part, un risque d'intoxication à travers la chaîne alimentaire pour les populations qui les utilisent pour leurs cultures et d'autre part, un risque pour la contamination des nappes souterraines.

References

1. Sabo A., Gani A.M., Ibrahim A.Q., *J. Environ. Pollut. and Human Health* 2 (2014) 91-99
2. Ameh E.G., *Res. J. of Env. and Earth Sc.* 6 (2) (2014) 57-65.
3. Wei B., Yang L., *Microchem. J.* 94 (2010) 99-107.
4. Duong T.T.T., Lee B.K., *J. Environ. Manag.* 92 (2011) 554-562.
5. Nasr S.M., Okbah M.A., Kasem S.M., *IJO* 1 (2006) 99-109.
6. Audry S., Schäfer J., Blanc G., Jouanneau J., *Environ. Pollut.* 132 (2004) 413-426.
7. Shrivastava P., Saxena A., Swarup A., *Lakes Reserv. Res. Manag.* 8 (2003) 1-4.
8. Miguel E.D., Iribarren I., Chacón E., Ordoñez A., Charlesworth S., *Chemosphere* 66 (2007) 505-513.
9. Poggio L., Viščaj B., Hepperle E., Schulin R., Marsan F.A., *landscape. urb. plan. J.* 88 (2008) 64-72.

10. Matías M.S.A., *Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III* (2008) 489 p.
11. Jakubovski M., Zinc and cadmium. In: *Patty's toxicol*, 5^e éd. (2) New York, (2001) 253-325.
12. Barceloux D.G., *Clin Toxicol*, (1999) 37(2) 173-194.
13. Plumlee G.S., Ziegler T.L., *Treatise on Geochem. Elsevier-Pergamon, Oxford* (2003) 264-310.
14. Fergusson J.E., *Pergamon Press, Oxford* (1990) 614 pp.
15. Bisson M., Diderich R., Houeix N., Hulot C., Lacroix G., Lefèvre J.P., Levêque S., Magaud H., Morin A., Pépin G., Pichard A., *INERIS* 60 p.
16. Golia E.E., Dimirkou A., Mitsios I.K., *Environ. Contam. Tox.* 81 (2008) 80–84.
17. Nezhad M.T.K., Tali M.G., Mahmoudi M.H., Pazira E., *Environ. Earth Sci.* 64 (2011) 1203–1213.
18. Atangana E.E., *Atlas des villes et villages du Cameroun* (2010).
19. Segalen P., *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* 5(2) (1967) 137-187.
20. Müller P., *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* 16(1) (1978) 73-82.
21. Nguetkam J.P., Kamga R., Villieras F., Ekodeck G.E., Yvon J., *Communication au Groupe Français des Argiles (GFA), Paris* (2002) 17-28.
22. Segalen P., Bachelier G., Curis M., Martin D., *Bulletin de la section de pédologie de l'Institut de Recherche du Cameroun* (1957) 57-62.
23. Segalen P., *ORSTOM, Coll. Etudes et Thèses, Paris, France*, (1994) 198p.
24. Nguetkam J.P., Ganwa A.A., Tchameni R., Tchatchueng J.B., *J. Eng and Appl. Sc.*, 2 (9) (2001) 14 - 21.
25. Mwamburi J., *Lakes Reserv. Res. Manage.* 8 (2003) 5–13.
26. Turekian K.K., Wedepohl K.H., *Am. Geol. Soc. Bull.* 72 (1961) 175–182.
27. Liu W., Zhao J., Ouyang Z., Soderlund L., Liu G., *Environ. Int.* 31(2005) 805-812.
28. Fang T.H., Hwang J.S., Hsiao S.H., Chen H.Y., *Marine Environ. Res.* 61(2) (2006) 224-243.
29. Ekengele N.L., Jung M.C., Ombolo A., Ngounou N.B., Ekodeck G.E., Mbome L.I., *Geosc. J.* 12(4) (2008) 337-347.
30. Müller G., *Geojournal* 2 (1969) 109-118.
31. Oumar B., Ekengele N.L., Balla O.A.D., *Afri. Sci. J.* 10(2) (2014) 184 – 198.
32. Segalen P., *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* 5(2) (1967) 137-187.
33. Perrono P., *Mém. D.U.E.S.S., D.E.P., Univ. Picardie, Amiens* (1999).
34. Chambre Syndicale Nationale des Fabricants de Chaux Grasses et Magnésiennes, *Capital Sol* 12 (2003) 2.
35. Olaoye O.P., Olushola A.A., Rasaki A.S., Olusanmi E.O., Tolulope B.A., *Afr. J. Environ. Sci. Technol.* 10(1) (2016) 1-8.
36. Kouame I.K., Gone D.L., Savane I., Kouassi E.A., Koffi K., Goula B.T.A. et Diallo M., *Afri. Sci. J.* 2(1) (2006) 39 – 56.
37. Nabil B., Said S., Ahmed L., El Housseine R., Elmostafa E., Abderrazzak K., *IJIAS* 12 (2) (2015) 334-341.
38. Kao T., El Mejahed K., Bouzidi A., *Bull. Institut Sci., Rabat, section Sciences de la Vie* 29 (2007) 89-92.
39. Tankari D.B., Guero Y., Dan Lamso N., Tidjani A.D., Ambouta K.J.M., Feidt C., Sterckeman T., Echevarria G., *Revue des bioressources* 3(2) (2013).
40. Baize D., *Courrier de l'environnement de l'INRA* 22 (1995) 37-46.
41. Bowen H.J.M., *Academic Press* (1979) 333p.
42. Turekian K.K., Wedepohl K.H., *Am. Geol. Soc. Bull.* 72 (1961) 175–182.
43. Ben H.H., Aloui T., Gallali T., Bouzid T., El Amri S., Ben H.R., *Agro Solutions* 19(2) (2008) 14p.
44. Leprun J.C., *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 24(4) (1988) 333-334.
45. Citeau L., *Thèse de l'Institut National d'Agronomie Paris-Grignon* (2004) 236p.
46. <http://terreetmer.canalblog.com/archives/2010/06/23/18394891.html>.
47. Garba S.T., Akan J.C., Ahmed I., *GJSFR-H: Environ. & Earth.* 14(1) (2014).
48. Martinelli I., *Thèse de Doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées de Lyon* (1999) 203p.