

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE
CONCENTRATION GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Ing.

PAR
Jeff Daniel NZE MEMIAGHE

CARACTÉRISATION DES SOLS URBAINS FORMÉS PAR REMBLAIEMENT :
APPROCHE PÉDOLOGIQUE INTÉGRANT L'ÉTUDE DE LA FRACTION GROSSIÈRE

MONTRÉAL, LE 4 JANVIER 2012

©Tous droits réservés, Jeff Daniel Nzé Memiaghe, 2012

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jean-Sébastien Dubé, ing., Ph.D, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Li Li, ing., Ph.D, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus, ing., Ph.D, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 6 DÉCEMBRE 2011

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je voudrais d'abord exprimer toute ma reconnaissance au Professeur Jean-Sébastien Dubé, ing. Ph.D, du Département de Génie de la construction de l'École de Technologie Supérieure, pour avoir éminemment supervisé l'exécution des travaux de recherche ainsi que la rédaction de ce mémoire. Son appui, sa grande disponibilité et son intérêt sans réserve ainsi que son expertise du domaine ont été une source de motivation constante.

Mes remerciements vont également à Mme Danielle Fournier, bibliothécaire pour m'avoir aidé dans mes recherches bibliographiques. Je remercie pour leur aide technique : Jean-Philippe Boudreault, étudiant au doctorat en génie de la construction, Mirela Sona, étudiante au doctorat en génie de l'environnement, et aussi Michael Dubois, technicien chargé de l'application technologique et informatique.

Je voudrais aussi souligner l'appui entier et sans limite de mes parents tout au long de mon cheminement académique. Merci papa et maman pour votre disponibilité et vos nombreux conseils. Je remercie aussi mes frères et sœurs pour leur soutien sans limite. Merci enfin à mon défunt oncle Dr Antoine Joël Olame Nzé et mes amis Verdier Assoum, Jonathan Tekeu et Thierry Mbog Towada pour avoir su partager un intérêt profond et stimulant pour la connaissance.

CARACTÉRISATION DES SOLS URBAINS FORMÉS PAR REMBLAIEMENT : APPROCHE PÉDOLOGIQUE INTÉGRANT L'ÉTUDE DE LA FRACTION GROSSIÈRE

Jeff Daniel NZE MEMIAGHE

RÉSUMÉ

Ce projet de recherche traite de l'application d'une démarche pédologique intégrant l'étude de la fraction grossière et de sa teneur en éléments métalliques afin de compléter la caractérisation des sols urbains formés par remblaiement.

La première phase du projet a été d'étudier les profils de sol d'un site urbain contaminé à l'aide de paramètres pédo-morphologiques, physico-chimiques et minéralogiques précis. Seize horizons anthropiques répartis sur 3 profils distincts ont été identifiés. Ils sont composés de matériaux hétérogènes : débris de construction, scories et fragments de roche.

Les profils étudiés se caractérisent par des contenus élevés en débris grossiers, des différences peu marquées de structures, des contenus pauvres en carbone organique. La mesure de pH alcalins dans les horizons anthropiques est liée au contenu en carbonates totaux. La distribution verticale des métaux dans les profils étudiés est hétérogène. La calcite et la chlorite semblent constituer des indicateurs minéralogiques anthropiques. La distribution verticale de l'ensemble de ces paramètres dans les profils étudiés est fortement liée à l'horizonation des profils et à la nature des matériaux constituant chaque horizon. Selon le *World Reference Base for Soil Resources (WRB)*, les profils étudiés sont des technosols *garbiques urbiques*.

La seconde phase du projet a montré que la fraction grossière constitue une proportion massique importante des sols urbains étudiés. Ainsi, la répartition des métaux (Cu, Mn, Pb et Zn) entre les fractions fines et grossières correspondantes est fonction de la nature des métaux analysés.

De plus, les apports massiques en métaux provenant des fractions grossières des différents horizons anthropiques sont minimales pour le Pb et le Zn et maximales pour le Cu et le Mn. Par conséquent, la fraction grossière doit être considérée afin d'avoir une meilleure représentativité des teneurs totales de métaux contenues dans les sols urbains.

Mots clés : pédologie- sols anthropiques urbains- fraction granulométrique grossière-éléments métalliques- granulochimie.

CHARACTERIZATION OF CONTAMINATED URBAN FILLS USING A PEDOLOGICAL APPROACH INTEGRATING THE COARSE GRAIN SIZE FRACTIONS

Jeff Daniel NZE MEMIAGHE

ABSTRACT

This research project studied the application of a pedological approach to improve the characterization of urban anthropogenic soils. This approach also included the study of the coarse size fraction of the soil and its influence on the soil's content in metallic elements.

The first phase of the project was performed on three soil profiles from an urban contaminated site. The profiles were characterized with pedo-morphological, physico-chemical and mineralogical parameters. Sixteen anthropogenic were identified among the three profiles and were made of heterogeneous materials, namely construction debris, slag and rock fragments.

The profiles were characterized by large contents of coarse debris, slightly differences in structure, and low contents of organic carbon. Alkaline pH values measured in the anthropogenic horizons were related to total carbonate content. The distributions of metallic elements with depth in the profiles were heterogeneous. Calcite and chlorite appear to be indicators of anthropogenic minerals. The distribution of these parameters in the profiles was strongly related to the sequence of horizons with depth and to the nature of the constitutive materials of each horizon. According to the *World Reference Base for Soil Resources (WRB)*, the studied profiles were classified as *urbic garbic Technosols*.

The second phase of the project showed that the coarse fraction was a significant mass proportion of the studied soils. Moreover, the distribution of metals (Cu, Mn, Pb, and Zn) between fine and coarse fractions was related to the nature of the metals analyzed. The contributions to the mass total of metallic elements from the coarse fractions of anthropogenic horizons were minimal for Pb and Zn, but were maximal for Cu and Mn. Therefore, the coarse fraction should always be considered for the representative assessment of the total contents of metals in urban anthropogenic soils.

Keywords: pedological approach- urban anthropogenic soils - coarse size fraction- metallic elements-contaminant grain size distribution.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
0.1 Problématique de recherche	1
0.2 Objectifs du projet.....	2
 CHAPITRE 1 LES SOLS ANTHROPIQUES URBAINS	 5
1.1 Description des sols anthropiques urbains.....	5
1.1.1 Genèse et classification des sols anthropiques urbains.....	5
1.1.2 Étude des sols urbains formés par remblaiement.....	8
1.2 Description de l'approche pédologique	10
1.2.1 L'identification des horizons	10
1.2.2 Étude des propriétés pédo-morphologiques et physico-chimiques des horizons étudiés	11
1.3 Application de la pédologie et de la minéralogie à la caractérisation des sols urbains.....	15
1.3.1 Apport de la pédologie à l'étude des sols anthropiques urbains	15
1.3.2 Apport de la minéralogie à l'étude des sols anthropiques urbains.....	17
1.4 Étude des métaux au sein de la fraction grossière des sols urbains	19
1.4.1 Importance de la fraction grossière des sols anthropiques urbains.....	19
1.4.2 La distribution granulométrique grossière : outil d'évaluation de la répartition des métaux au sein de la fraction grossière des sols urbains...	20
 CHAPITRE 2 MATÉRIELS ET MÉTHODES	 25
2.1 Présentation du site d'étude	27
2.2 Échantillonnage et préparation des échantillons.....	29
2.3 Phase 1 - Description des profils étudiés	30
2.3.1 Identification des horizons.....	30
2.3.2 Détermination des propriétés pédo-morphologiques et physico-chimiques des horizons étudiés	31
2.3.2.1 Structure du sol	31
2.3.2.2 Contenu en débris grossiers	32
2.3.2.3 Couleur du sol	32
2.3.2.4 Granulométrie-Texture	32
2.3.2.5 Le pH du sol.....	33
2.3.2.6 Contenu en Carbone Organique Total (COT).....	33
2.3.2.7 Contenu en carbonates (CaCO ₃)	34
2.3.2.8 Contenu en métaux	34
2.3.3 Étude minéralogique des horizons anthropiques	35
2.4 Phase 2- Teneurs en métaux lourds des fractions grossières des différents horizons anthropiques étudiés.....	36
2.4.1 Distribution granulométrique de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport à la fraction fine tamisée à 2 mm	36

2.4.2	Répartition des métaux lourds entre les fractions fines et les fractions grossières des différents horizons anthropiques	37
2.4.3	Apport massique en métaux de la fraction grossière (2-9.5 mm) des différents horizons anthropiques étudiés	37
2.5	Contrôle et qualité des analyses	39
CHAPITRE 3	RÉSULTATS-DISCUSSION	41
3.1	Phase 1- Description des profils étudiés	41
3.1.1	Présentation sommaire des résultats	41
3.1.2	Analyse et discussion des résultats	48
3.1.2.1	Identification et nature des horizons anthropiques	48
3.1.2.2	Détermination des propriétés pédo-morphologiques et physico-chimiques des horizons étudiés.....	50
3.1.2.2.1	Contenu en débris grossiers	50
3.1.2.2.2	Structure des sols	51
3.1.2.2.3	Couleur des sols	52
3.1.2.2.4	Texture des sols.....	53
3.1.2.2.5	Contenu en Carbone Organique Total (COT).....	55
3.1.2.2.6	pH du sol et contenu en carbonates (CaCO ₃).....	56
3.1.2.2.7	Teneurs en métaux de la fraction fine.....	58
3.1.2.3	Étude minéralogique des horizons anthropiques	60
3.2	Phase 2 – Teneurs en métaux lourds des fractions grossières des horizons anthropiques étudiés.....	67
3.2.1	Présentation sommaire des résultats	67
3.2.2	Analyse et discussion des résultats	71
3.2.2.1	Distribution granulométrique de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport à la fraction fine tamisée à 2 mm	71
3.2.2.2	Répartition des métaux lourds (Pb, Zn, Mn et Cu) entre les fractions fines et grossières.....	72
3.2.2.3	Apports massiques en métaux de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport aux masses totales en éléments traces contenues dans les échantillons de sol	74
3.2.2.3.1	Calcul de l'apport massique en métaux de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport aux masses totales de métaux contenues dans un échantillon prélevé et tamisé à 9.5 mm	74
3.2.2.3.2	Étude des apports massiques en métaux des fractions grossières (2-9.5 mm) des différents horizons anthropiques étudiés.....	75
CONCLUSION		79
4.1	Conclusion	79
4.2	Recommandations.....	82
ANNEXE I	ÉTUDE MINÉRALOGIQUE DES HORIZONS ANTHROPIQUES PAR DIFFRACTION AUX RAYONS X	85

ANNEXE II	RÉPARTITION DES MÉTAUX LOURDS (PB, ZN, MN ET CU) ENTRE LES FRACTIONS FINES ET LES FRACTIONS GROSSIÈRES CORRESPONDANTES	91
ANNEXE III	CALCUL DES APPORTS MASSIQUES EN MÉTAUX PROVENANT DES FRACTIONS DES DIFFÉRENTS HORIZONS ANTHROPIQUES ÉTUDIÉS	99
BIBLIOGRAPHIE		115

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Qualificatifs désignant l'ordre des technosols selon le WRB.....6
Tableau 2.1	Liste des paramètres utilisés31
Tableau 3.1	Description pédologique du profil 142
Tableau 3.2	Description pédologique du profil 243
Tableau 3.3	Description pédologique du profil 344
Tableau 3.4	Relation entre le contenu massique en Débris Grossiers (D.G) et les teneurs en C _{org} évaluées des horizons de surface et de profondeur des 3 profils étudiés.....46
Tableau 3.5	Relation entre le pH et le contenu en CaCO ₃ pour les 3 profils étudiés.....46
Tableau 3.6	Teneurs pondérales en métaux des différentes fractions granulométriques de l'échantillon de scories de l'horizon (55-80 cm) du Profil 1 (mg/ kg fraction granulométrique).....69

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Typologie des technosols7
Figure 1.2	Sols urbains de la ville de Montréal.....8
Figure 1.3	Les différentes structures de sol.....12
Figure 1.4	Abaque des classes texturales de sols.13
Figure 2.1	Représentation schématique de la structure méthodologique de l'étude26
Figure 2.2	Périmètre de la cour Glen27
Figure 3.1	Profils pédologiques étudiés41
Figure 3.2	Distribution des teneurs en Carbone organique selon la profondeur du sol pour les 3 profils.....45
Figure 3.3	Distribution des teneurs en Carbone organique selon les différents horizons anthropiques des 3 profils45
Figure 3.4	Étude des métaux dans le profil 1 (Fraction fine).....47
Figure 3.5	Étude des métaux dans le profil 2 (Fraction fine).....47
Figure 3.6	Étude des métaux dans le profil 3 (Fraction fine).....48
Figure 3.7	Distribution granulométrique de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport à la fraction fine (Profil 1).....67
Figure 3.8	Distribution granulométrique de la fraction grossière68
Figure 3.9	Distribution granulométrique de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport à la fraction fine (Profil 3).....68
Figure 3.10	Apports massiques en métaux du profil 169
Figure 3.11	Apports massiques en métaux du profil 2.....70
Figure 3.12	Apports massiques en métaux du profil 3.....70

INTRODUCTION

0.1 Problématique de recherche

Les sols anthropiques urbains sont des sols essentiellement présents dans les milieux urbanisés et fortement industrialisés (Burghardt, 1994; Sobocka, 2003). En effet, la littérature scientifique les définit comme étant des sols fortement influencés par les activités industrielles et renfermant des artéfacts (Lehman et Stahr, 2007), ce qui les diffère des sols naturels.

Par ailleurs, l'étude des sols anthropiques urbains prend une importance de plus en plus considérable dans le monde, compte tenu de l'accélération de l'urbanisation (Lehmann et Stahr, 2007). En effet, près de 50% de la population mondiale vit en milieu urbain dont 80 % en Europe et au Canada (Biasioli et al., 2006; Norra et al., 2008). L'émergence de problèmes environnementaux liés à la contamination de ces milieux impose l'étude de ces sites fortement hétérogènes. C'est le cas des sols anthropiques rencontrés à Montréal dont la pédogenèse résulte d'activités de remblaiement.

La diversité des matériaux constituant les sols anthropiques, combinée à l'hétérogénéité de la contamination rend les sites anthropiques urbains difficiles à caractériser. Ainsi, une meilleure connaissance des propriétés des sols anthropiques urbains est indispensable afin de contribuer à mieux gérer les espaces urbains.

Dans ce contexte, des travaux portant sur la caractérisation et l'hétérogénéité des sols anthropiques urbains à l'aide des techniques sédimentologiques, couplées aux méthodes géophysiques ont été réalisés (Goutaland et al., 2008; Boudreault et al., 2010). Toutefois, une étude pédologique des sols anthropiques urbains, basée sur des paramètres pédomorphologiques précis et couplée d'investigations physico-chimiques et minéralogiques concises, constituerait un support à la caractérisation de ces milieux.

Par ailleurs, les sols anthropiques urbains sont composés d'une fraction importante de particules grossières (> 2 mm), laquelle est généralement constituée de débris anthropiques grossiers. Or, seule la fraction fine des sols urbains est généralement considérée lors de l'échantillonnage des sols contaminés qu'ils soient anthropiques ou non (MDDEP, 2008). En effet, une attention considérable a été souvent accordée au rôle joué par les particules fines de sol, composées essentiellement d'argile et de silt. Ces particules possèdent des propriétés physico-chimiques spécifiques (adsorption, rétention et autres...) qui régissent le comportement d'un sol, notamment vis-à-vis des contaminants.

Aussi, la fraction grossière a toujours été considérée dans la littérature en sols comme chimiquement inerte et non dangereuse, donc suscitant peu d'intérêt (Tarzia et al., 2002; Remon et al., 2005). Cependant, la fraction grossière d'origine anthropique peut relarguer des contaminants, tels les métaux dans la solution du sol ce qui affecte leur concentration totale en milieu urbain (El Khalil et al., 2008).

Ainsi, dans un contexte de gestion environnementale, la caractérisation des sols urbains par l'étude de la fraction fine sans tenir compte de la fraction grossière peut causer un problème de représentativité de la contamination en milieu urbain d'où l'importance d'une approche pédologique, adaptée aux sols urbains, qui intègre l'étude de la fraction grossière afin de compléter la caractérisation des sols urbains sur la base des concentrations de contaminants.

0.2 Objectifs du projet

À court terme, ce projet de recherche vise spécifiquement à :

1. Utiliser l'approche pédologique comme support de caractérisation d'un profil de sol anthropique urbain,
2. Évaluer l'apport réel en métaux lourds des fractions grossières constitutives des différents horizons anthropiques étudiés.

L'objectif à long terme de la recherche dans laquelle s'inscrit ce projet est d'introduire un système de classification adapté aux sols anthropiques urbains, qui intègre l'analyse fonctionnelle d'un ensemble de paramètres physiques, de critères chimiques, de tests hydrodynamiques et de la typologie des matériaux constitutifs de ces milieux fortement anthropisés.

La mise en place de ce système de codification vise à améliorer les connaissances sur les sols urbains et à renforcer ainsi le processus d'aide à la décision concernant la gestion environnementale de ces sols.

CHAPITRE 1

LES SOLS ANTHROPIQUES URBAINS

1.1 Description des sols anthropiques urbains

1.1.1 Genèse et classification des sols anthropiques urbains

Les sols anthropiques urbains sont des sols essentiellement présents dans les milieux urbanisés et industrialisés (Burghardt, 1994; Sobocka, 2003). En effet, la littérature scientifique les définit comme étant des sols fortement influencés par les activités industrielles et renfermant des artéfacts (Lehman et Stahr, 2007), ce qui les diffère des sols rencontrés en milieu naturel. De plus, ces sols se caractérisent par des processus de formation régis par des activités humaines ou anthropiques. Kosse (1990) puis Effland et Pouyat (1997) parlent alors d'anthropédogenèse.

Historiquement, l'étude des sols anthropiques urbains remonte en Europe au milieu du XIX^e siècle, avec des travaux effectués par Ferdinand Senft sur l'impact des activités industrielles et minières dans les sols en milieu urbain. Par la suite, plusieurs activités de recherche ont été effectuées dans ce domaine de la science du sol. Ainsi, plusieurs comités de réflexion ont vu le jour dans ce cadre d'étude : le SUITMA, ICOMANTH, TUSEC-IP et INTERURBAN. L'objectif global de ces groupes de travail est d'avoir une meilleure compréhension de la dynamique de ces sols en milieu urbain et industrialisé.

Selon le *World Reference Base for Soil Resources* (WRB), les sols anthropiques urbains sont assimilés aux technosols (FAO, 2006; IUSS-WRB, 2006; Rossiter, 2007). Récemment introduit, ce terme désigne les sols contenant au moins 30% d'artéfacts (volume). Par définition, les artéfacts sont des substances solides ou liquides rencontrées dans le sol, qui ont été créées ou modifiées substantiellement par les humains dans le cadre d'activités industrielles passées.

Par ailleurs, le *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) propose des préfixes et des suffixes qui font référence à cet ordre. Le tableau 1.1 résume les préfixes et les suffixes désignés pour qualifier les technosols. Les préfixes utilisés désignent les cinq sous-groupes de technosols tandis que les suffixes utilisés enregistrent les propriétés spécifiques aux horizons.

Tableau 1.1 Qualificatifs désignant l'ordre des technosols selon le WRB
Adapté de Lehman et Stahr (2007, p.258)

<i>préfixe</i>	définition	<i>suffixe</i>	définition
<i>ékranique</i>	Présence d'une roche dure à partir des 5 premiers cm de la surface (pavé)	<i>calcaric</i>	Horizon avec un contenu en carbonates supérieur à 2%
<i>garbique</i>	Déchets organiques	<i>arénic</i>	Horizon à dominance sableuse
<i>linique</i>	Présence d'une géomembrane	<i>siltic</i>	Horizon dont les particules silteuses (> 2 et < 50 µm) sont dominantes
<i>spolique</i>	Déchets d'origines industrielles (résidus d'aciérie, miniers)	<i>skeletalic</i>	Présence de débris grossiers
<i>urbique</i>	Débris de construction ou déchets d'origine domestiques	<i>toxic</i>	Présence de substances organiques ou inorganiques toxiques autres que les ions Al, Fe, Na, Ca et Mg

Ainsi, l'ordre des technosols est classé en cinq sous-groupes selon l'origine ou la nature des débris rencontrés: *ékranique*, *garbique*, *linique*, *spolique* et *urbique*. Le *technosol ékranique* est un technosol contenant une roche dure ou technogénique à partir des 5 premiers cm de la surface du sol et couvrant près de 95% (en volume) de l'extension horizontale du sol. Le *technosol garbique* est un sol qui possède plus de 35% (en volume) d'artéfacts constitués essentiellement de déchets organiques. Le *technosol linique* se caractérise par la présence d'une géomembrane construite, continue, et dotée d'une forte ou faible perméabilité à l'intérieur des 100 premiers cm du sol. Le *technosol spolique* est un technosol qui contient plus de 35% (en volume) d'artéfacts constitués de matériaux et de déchets d'origine industrielle (résidus d'aciérie, résidus miniers). Enfin, le *technosol urbique* est un technosol

possédant plus de 35% (en volume) d'artéfacts constitués de débris de construction et déchets d'origine ménagère. La figure 1.1 représente trois exemples de technosols.

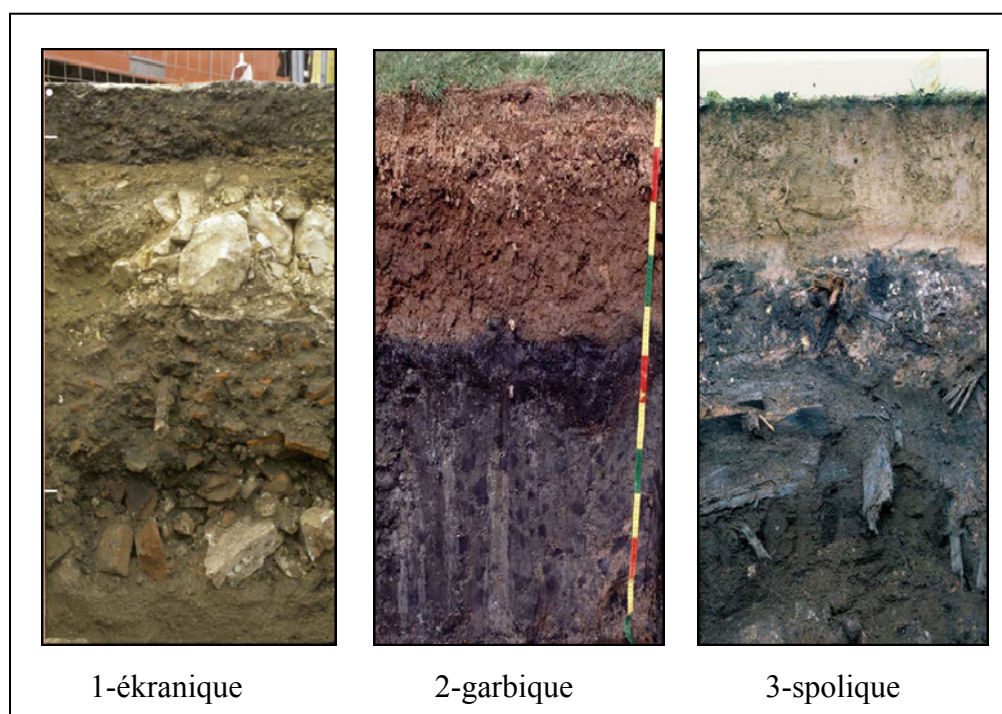


Figure 1.1 Typologie des technosols
Tirée de Lehmann et Stahr (2007, p.260)

Néanmoins, un sol anthropique urbain ayant moins de 30% d'artéfact peut être qualifié de régosol auquel le suffixe technique est rajouté (FAO, 2006; Rossiter, 2007; Puskas et Farsang, 2008). Par ailleurs, le système canadien de classification des sols ne classe pas les sols anthropiques urbains car ils ne sont pas considérés comme des sols.

1.1.2 Étude des sols urbains formés par remblaiement

Comme dans la plupart des grands centres urbains possédant un riche passé industriel, on retrouve couramment des sols anthropiques à Montréal. Ces derniers sont essentiellement formés d'une succession d'horizons communément appelés remblais, d'où le terme remblai urbain. En effet, Kosse (2000) définit les remblais urbains comme des sols rencontrés en milieu urbain.

Le remblaiement est le processus de remplissage de différents matériaux présents en milieu urbain. Ainsi, la formation d'un profil de sol anthropique à Montréal résulte de différentes phases de remblaiement ajoutant différents matériaux d'origine industrielle. La figure 1.2 représente trois exemples de sols anthropiques rencontrés à Montréal, souvent qualifiés de remblais urbains hétérogènes.



Figure 1.2 Sols urbains de la ville de Montréal
Tirée de Boudreault et al. (2005, p.15)

L'étude réalisée par le Consortium de Recherche appliquée en traitement et transformation des substances Minérales (COREM) en collaboration avec le Centre d'Excellence de Montréal en Réhabilitation de Sites (CEMRS), confirme l'existence d'une diversité de matériaux hétérogènes constituant les sols anthropiques de la ville de Montréal, notamment les remblais formés par les débris de démolition (sable, briques etc.), les débris domestiques et les remblais formés de cendres et de scories. Ces derniers se classent en deux groupes : les cendres et scories d'incinérateurs provenant d'activités industrielles telles que la sidérurgie et les cendres et scories de bouilloire formés de résidus de combustion du charbon (Wilhelmy et Daniel, 2002). D'ailleurs, Duchesne et Mercier (2003) évoquent aussi cette différence entre les cendres de bouilloire et les cendres d'incinérateurs.

Selon ce rapport, les cendres et scories de bouilloire constituent le matériel contaminant le plus important sur l'île de Montréal (Wilhelmy et Daniel, 2002). Cette situation s'explique par le fait que dans la majorité des villes nord-américaines, le chauffage au charbon a longtemps prévalu. Ainsi, les cendres et les scories de bouilloire couvrent une surface importante de Montréal tandis que les cendres et scories d'incinérateurs sont observées localement sur l'île.

En résumé, la grande diversité des matériaux constituant les sols anthropiques qui est à l'origine de l'hétérogénéité de la contamination rend les sites anthropiques urbains difficiles à caractériser. Par ailleurs, une meilleure connaissance du fonctionnement et des propriétés des sols urbains formés par remblaiement est indispensable afin de contribuer à mieux gérer les espaces urbains. Il y'a donc nécessité d'étudier le potentiel d'une approche pédologique reposant sur un ensemble de critères pédo-morphologiques et de paramètres physico-chimiques précis, afin de compléter la caractérisation des sols contaminés sur la base des concentrations de contaminants.

1.2 Description de l'approche pédologique

La pédologie (du grec *pédon* = sol) se définit comme l'étude des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, de leur organisation (structure et fonctionnement) en relation avec leur répartition dans l'espace et leur évolution dans le temps (Lozet et Matthieu, 1997). Par conséquent, elle constitue une conception dynamique de la Science du Sol. Le sol étant ainsi défini comme un système dynamique complexe, qui se forme, évolue, atteint un équilibre et peut se dégrader (Duchaufour, 1997).

Souvent utilisée dans les milieux agricoles et forestiers, l'approche pédologique était nécessaire afin de décrire et de caractériser les profils étudiés. L'objectif d'alors était d'en dégager les propriétés essentielles en termes de fertilité. Aussi, cette méthodologie spécifique reposait sur deux principales étapes qui sont l'identification des horizons et l'étude des propriétés pédo-morphologiques et physico-chimiques des horizons identifiés.

1.2.1 L'identification des horizons

L'horizon se définit comme une couche de matériau de sol minéral ou organique, approximativement parallèle à la surface du sol, dont les caractéristiques sont modifiées par les processus de formation de sol (SISCan, 1998). L'horizon constitue l'unité de base de la description d'un profil pédologique (Caillier, 2005). L'ensemble de tous les horizons d'un sol forme le profil pédologique. Ainsi, la détermination d'un profil pédologique est fonction de l'identification des horizons qui en constituent le profil étudié.

Le système canadien de classification classe les horizons en 2 groupes à savoir les horizons organiques et les horizons minéraux selon les teneurs en carbone organique (C_{org}) mesurées. En effet, les horizons minéraux contiennent moins de 17% de C_{org} tandis que les horizons organiques en contiennent plus de 17% (SISCan, 1998). Les horizons minéraux sont de type A, B et C tandis que les horizons organiques sont de type O, L, F, et H.

L'horizon A est un horizon minéral de surface ou proche de celui-ci qui peut être enrichi ou appauvri de matériau en solution. L'horizon B est un horizon de profondeur qui se caractérise par un degré d'altération plus fort que celui de la roche mère ou par une structure différente de celle des horizons A ou par un enrichissement par illuviation d'éléments fins ou amorphes. L'horizon C est un horizon de profondeur proche de la roche mère.

Quant aux horizons organiques, ils se rencontrent dans les sols organiques et ordinairement à la surface des sols minéraux (SISCan, 1998; Caillier, 2005). L'horizon O est un horizon organique dérivé de matériaux de tourbe. Les horizons L, F, H se caractérisent par une accumulation de matière organique à la surface des sols minéraux selon différents degrés. L'horizon L (Litière) est un horizon organique peu décomposé. L'horizon F (Fermentation) est un horizon organique partiellement décomposé tandis que l'horizon H (Humification) est un horizon organique fortement décomposé.

1.2.2 Étude des propriétés pédo-morphologiques et physico-chimiques des horizons étudiés

Cette étape résume les principales propriétés pédo-morphologiques et physico-chimiques nécessaires à la réalisation d'un profil pédologique. Ces paramètres méritent brièvement d'être rappelés.

a) Structure du sol

Évaluée visuellement sur le terrain, la structure du sol se réfère à l'organisation voire au mode d'arrangement physique des particules de sol appelées agrégats ou peds. À cet effet, l'évaluation de la structure du sol est effectuée à l'aide de la classification présentée à la figure 1.3 ci-dessous.

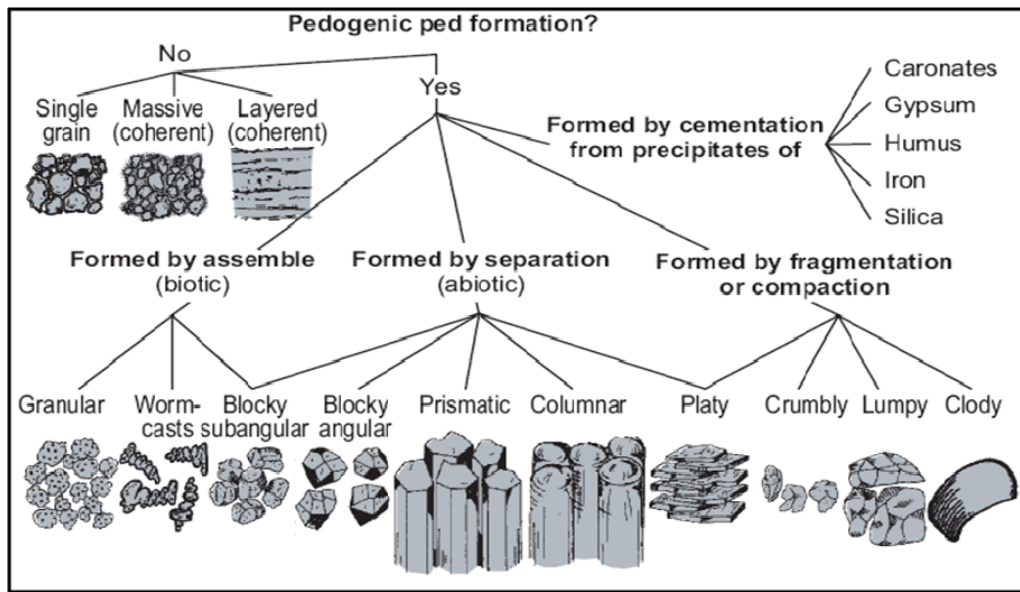


Figure 1.3 Les différentes structures de sol
Tirée de FAO (2006, p. 45)

La figure 1.3 représente les différentes structures de sol rencontrées dans un horizon étudié. D'après cette figure, les structures de sol présentées sont spécifiques au mode de formation des particules.

b) Couleur du sol

La couleur reflète les conditions d'oxydation et de réduction du sol à travers la mise en évidence de différentes particules notamment les particules organiques humiques (couleur noire) ou les oxydes de fer (couleur jaune, orange et rouge). Par ailleurs, les sols sont généralement plus sombres à l'état humide qu'à l'état sec. Ainsi, le contenu en eau influence la couleur du sol.

c) Granulométrie-Texture

La granulométrie est définie comme la distribution des particules de sol selon leur taille. Ce paramètre constitue une propriété importante car il permet d'évaluer la texture des sols étudiés. En effet, la texture du sol est souvent déterminée à l'aide de l'abaque de classes

texturales, selon l'évaluation de la proportion de particules de sable et d'argile. La figure 1.4 présente l'abaque de classes texturales, tiré du Système Canadien de Classification des Sols, Édition 1998 (*Voir Figure 1.4, p. 13*).

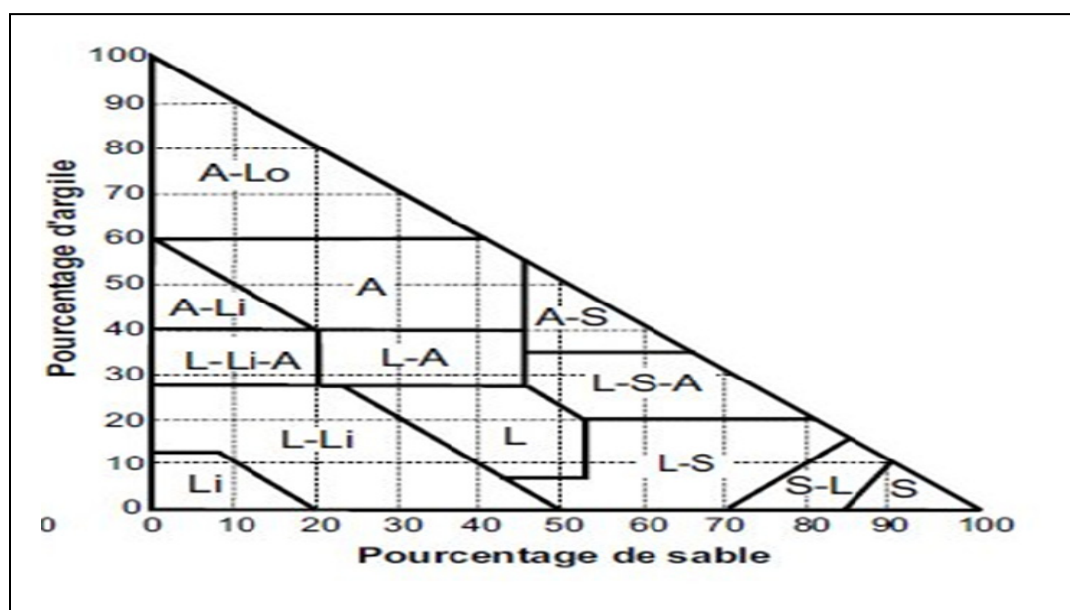


Figure 1.4 Abaque des classes texturales de sols.
Tirée de SISCan (1998)

Les abréviations utilisées dans le triangle des textures sont : A-Lo, argile lourde; A-Li, argile limoneuse; A, argile; A-S, argile sableuse; L-Li-A, loam limono-argileux; L-A, loam argileux; L-S-A, loam sablo-argileux; L-Li, loam limoneux; L, loam; L-S, loam sableux; Li, limon; S-L, sable loameux; S, sable.

Par ailleurs, le système canadien de classification des sols classe la texture des scories en deux groupes à savoir : *scoriacée*, lorsque le sol est composé de 60% ou plus (en poids) de scories et d'au moins 35 % de particules de scories supérieures à 2 mm de diamètre ou *creuseuse*, lorsque le sol est composé de 60% ou plus (en poids) de scories et moins de 35 % de particules de scories supérieures à 2 mm de diamètre (SISCan, 1998). Toutefois, l'usage

de ces termes s'applique généralement aux sols contenant des cendres et des scories d'origine volcanique (SISCan, 1998).

d) Le pH du sol

Il constitue une propriété chimique très importante. En effet, le pH influence largement les réactions chimiques se déroulant dans le sol. Spécifiquement une diminution de pH constitue un des principaux facteurs causant le relargage des métaux retenus par la phase solide du sol (Dubé, 1997).

e) Contenu en carbone organique total (COT)

La détermination du carbone organique total permet d'évaluer la quantité de matière organique présente dans les sols. En effet, la matière organique amplifie grandement les effets de la capacité d'échange cationique du sol (CEAEQ, 2006). Sur le plan environnemental, la matière organique peut accroître la rétention des métaux.

f) Contenu en carbonates (CaCO_3)

Le contenu en carbonates constitue un indicateur du pouvoir tampon d'un sol. Le pouvoir tampon se définit comme étant la capacité de résistance d'un sol à une variation de pH. Par conséquent, le pouvoir tampon d'un sol à travers le contenu en carbonates influence le processus de dissolution et de rétention des métaux.

1.3 Application de la pédologie et de la minéralogie à la caractérisation des sols urbains

1.3.1 Apport de la pédologie à l'étude des sols anthropiques urbains

Le développement de la science du sol, particulièrement la pédologie a abouti à une meilleure connaissance des sols agricoles et forestiers, à travers l'identification des horizons étudiés et l'étude des propriétés pédo-morphologiques et physico-chimiques des horizons identifiés. Cependant, les milieux fortement anthropisés auxquels appartiennent les sols urbains ont été longtemps délaissés, voire ignorés. Florentin *et al.* (2000, p.1) ont expliqué d'abord ce fait par le manque d'intérêt économique que représentaient alors les espaces fortement anthropisés. De plus, selon les chercheurs, la difficulté liée à l'extrême variabilité des matériaux constitutifs de ces sols constituerait une autre des raisons liée à l'absence d'étude de ces sites (Florentin et al., 2000). Aujourd'hui, l'émergence de nombreuses problématiques environnementales liées à la contamination des sites urbains impose l'étude de ces milieux fortement hétérogènes.

À cet effet, partant du constat qu'il n'existait pas de limites nettes mais plutôt une anthropisation croissante et progressive des sols développés sous végétation naturelle aux sols des milieux industriels et urbains, plusieurs approches pédologiques ont été élaborées.

Récemment en France, Florentin *et al.* (2000) suivis de Schwartz *et al.* (2000) ont réalisé des études pédologiques sur des sols anthropiques urbains souvent qualifiés de friches industrielles. L'objectif de ces études était de montrer dans quelles mesures les méthodes pédologiques appliquées sur les sols forestiers et agricoles pouvaient être adaptées à la caractérisation des sols industriels. Le travail entrepris a montré que la démarche pédologique classique est applicable moyennant un certain nombre d'adaptations, particulièrement au niveau de la phase préparatoire. En effet, la phase préparatoire de collecte et d'examen de documents historiques permet d'avoir un aperçu des activités industrielles passées qui se sont déroulées sur le site d'étude. De plus, l'utilisation de travaux antérieurs de

caractérisation constitue un support important afin d'avoir une meilleure compréhension du site.

Les travaux de Florentin *et al.* (2000) et Schwartz *et al.* (2000) ont montré que les profils étudiés présentaient une grande variabilité verticale et horizontale avec des teneurs élevées en métaux (Pb, Zn) pour certains horizons. Par ailleurs, certains critères pédologiques se sont avérés très importants face aux nombreux problèmes de pollution ou requalifications de site. Ainsi, la structure du sol permet de préciser le degré des tassements des matériaux et d'augurer les possibilités de développement d'un système racinaire. Ensuite, la nature, l'épaisseur, l'ordre de succession des matériaux et la présence de discontinuités conditionnent le comportement et le devenir des solutés. Enfin, le test à l'acide, dont le résultat donne une indication sur le risque de mobilité des éléments traces présents. Ainsi, selon Schwartz *et al.* (2000), les observations effectuées aident à apprécier la qualité des sols, à comprendre leur fonctionnement et à prévoir les risques de transfert des polluants dans l'écosystème.

Par la suite, Puskàs et Farsang (2008) ont développé une démarche similaire à la caractérisation des sols anthropiques de la ville de Szeged (Hongrie). L'objectif de cette étude était d'utiliser l'approche pédologique afin de mettre en évidence des indicateurs spécifiques et nécessaires à la caractérisation des sols anthropiques de Szeged. Les résultats ont montré que la plupart des paramètres physico-chimiques examinés à savoir, le contenu élevé en artéfacts, la faiblesse et la fluctuation du contenu en humus, le contenu en azote, les teneurs élevées et les fluctuations de CaCO_3 en relation avec le pH à l'eau, constituaient des excellents marqueurs de l'activité anthropique.

Au Québec, Dermont (2005) a utilisé une démarche spécifique à l'étude des sols anthropiques urbains dans le cadre d'une stratégie de décontamination. Les objectifs de cette démarche étaient de localiser les horizons étudiés, de définir leurs propriétés physico-chimiques et minéralogiques en association avec les profils de résistivité établis. Cette

méthodologie basée sur une approche pluridisciplinaire intègre la pédologie couplée aux méthodes minéralogiques et géophysiques.

À cet effet, d'autres travaux utilisant des techniques sédimentologiques, couplées aux méthodes géophysiques ont été effectués sur la caractérisation et l'hétérogénéité des sols anthropiques urbains (Boudreault et al., 2005; 2010; Goutaland et al., 2008).

Aussi, une démarche spécifique, basée sur une méthodologie liée à l'étude de profils pédologiques de sols urbains formés par remblaiement, constituerait un support à la caractérisation de ces sites anthropiques. L'étude de profils pédologiques s'effectuerait à l'aide de critères pédo-morphologiques décrits sur le terrain et complétés au laboratoire (profondeur du profil, identification, nature, couleur et structure des horizons, contenu massique des éléments grossiers), accompagnés de paramètres physico-chimiques (pH, texture, teneur en carbone organique, carbonates et métaux) réalisés au laboratoire.

1.3.2 Apport de la minéralogie à l'étude des sols anthropiques urbains

Les sols anthropiques urbains sont généralement des sols contaminés. Au Québec, le Pb, le Zn et le Cu sont les métaux prépondérants des sites anthropiques urbains (MDDEP, 2007). Par ailleurs, un des problèmes rencontrés dans la caractérisation des métaux au sein des sites anthropiques urbains, est l'hétérogénéité de la contamination reliée à la diversité des matériaux constitutifs des sols urbains.

Les méthodes d'extractions séquentielles sélectives (ESS) constituent des outils d'évaluation de la distribution géochimique des métaux dans les sols à travers une estimation d'association qualitatives entre les métaux et les phases minéralogiques (échangeable, acido-soluble, réductible, oxydable et phase résiduelle). Cependant d'un point de vue quantitatif, ces méthodes présentent des limites. Duchesne et Mercier (2003, p.732) et Dermont (2005, p.6) affirment que les méthodes d'extraction séquentielles sélectives sont inadaptées pour renseigner sur la caractérisation physique et minéralogique (densité, composition,

distribution et phase minéralogique) d'une contamination métallique sous forme de particules, d'où l'intérêt de la minéralogie à l'étude de sols urbains formés de matériaux anthropiques fortement contaminés tels que les scories/cendres de bouilloire ou les scories/cendres d'incinérateurs.

La minéralogie est la science qui étudie la nature et les propriétés des minéraux, éléments constitutifs des roches. La minéralogie trouve des applications environnementales notamment au niveau de l'identification des différentes phases minéralogiques (oxydes, hydroxydes, carbonates et sulfures) associées aux métaux présents dans les sols contaminés.

Plusieurs auteurs confirment l'utilisation de la minéralogie comme support d'étude des sols contaminés (Wagner et al., 1997; Rickers et al., 1998a; 1998b; Duchesne et Mercier, 2003; Bray et al., 2008). Aussi, Duchesne et Mercier (2003, p.731) soulignent l'importance d'une méthode de caractérisation minéralogique qui, en plus de l'identification des particules de contaminant, tient compte de 3 facteurs supplémentaires à savoir la distribution des phases métallifères qui peuvent être présents en surface ou incluses dans le volume des particules, de la taille des particules porteuses (phases généralement silicatées) et des phases métallifères et de la proportion moyenne des phases métallifères dans les particules contaminées. À cet effet, les chercheurs affirment qu'une particule de sol dont la surface serait entièrement constituée de phase métallifère (ex. plombifère) aurait un degré de libération de 100% (Duchesne et Mercier, 2003). Cela constitue un risque environnemental important.

L'application de la minéralogie à des fins de caractérisation des sols anthropiques nécessite l'usage de nombreux outils. Ainsi, la technique de diffraction aux rayons X (DRX) identifie les phases minéralogiques majeures d'une matrice de sol à l'échelle macroscopique. Toutefois, les minéraux identifiés peuvent être des sources de métaux à condition que ces phases soient présentes selon une limite de détection supérieure à 1 %. D'ailleurs, Duchesne et Mercier (2003) mentionnent que la diffraction aux rayons X (DRX) n'est pas sensible aux phases mineures de contaminants présents à seulement quelques pourcents de l'échantillon.

D'autres techniques seraient plus appropriées. Par exemple, les techniques de microscopie électronique (microscopie électronique à balayage, microsonde électronique, rayons X par spectromètre en énergie dispersive) permettent de mettre en évidence d'une part, les propriétés des phases porteuses de métaux à travers l'étude de leurs dimensions, leur densité moyenne, leur taille et leur surface totale et d'autre part, les caractéristiques des phases métallifères (morphologie, % de surface et degré de libération du métal).

1.4 Étude des métaux au sein de la fraction grossière des sols urbains

1.4.1 Importance de la fraction grossière des sols anthropiques urbains

Les sols anthropiques urbains sont généralement composés d'une importante fraction de particules grossières (> 2 mm). La fraction grossière désigne l'ensemble des particules de sol supérieures à 2 mm (Miller et Guthrie, 1984; Poesen et al., 1994). Cette fraction est essentiellement constituée de débris grossiers d'origine naturelle (cailloux, fragments de roche) ou anthropique (débris de construction, débris de démolition et mâchefers) (MDDEP, 2008; El Khalil et al., 2008).

La présence de débris grossiers dans le sol, affecte la nature voire la composition de la fraction fine du sol. En effet, une fois altérés, ces matériaux contribuent à une modification considérable des caractéristiques physiques, chimiques, morphologiques et minéralogiques du sol (Corti et al., 1998; Martin-Garcia et al., 1999; El Khalil et al., 2008).

De même, au niveau environnemental, les débris grossiers anthropiques ont la capacité de libérer les éléments traces dans les technosols. En effet, Dermont (2008, p.241) affirme que les processus d'altération physico-chimiques peuvent radicalement altérer les particules grossières, libérant des métaux. Ainsi, selon El Khalil et al. (2008), les matériaux grossiers anthropiques tels que les débris de construction et les résidus de porcelaine contribuent à la libération des métaux lourds tels que le zinc et le cadmium au sein des sols urbains de Marrakech.

Quant à la fraction grossière d'origine naturelle, généralement composée de fragments de roche, elle contribue à la libération du cuivre au sein du sol en milieu urbain (El Khalil et al., 2007; 2008), d'où l'importance d'une étude sur le contenu réel des métaux provenant de la fraction grossière des sols anthropiques formés par remblaiement.

1.4.2 La distribution granulométrique grossière : outil d'évaluation de la répartition des métaux au sein de la fraction grossière des sols urbains

La granulochimie est l'étude de la composition chimique des différentes tailles de particules de sol à travers les différentes fractions granulométriques étudiées (Duchesne et Mercier, 2003). Par conséquent, les résultats d'une granulochimie peuvent aider, d'une part à la compréhension de la répartition des concentrations de métaux, ce qui permet d'étudier leur comportement mais aussi d'autre part, en cas de contamination, à la sélection des techniques de décontamination (Wang et al., 2006). À cet effet, Duchesne et Mercier (2003) affirment que l'enlèvement d'une fraction granulométrique fortement contaminée peut faciliter le traitement d'un sol dans le cadre d'une stratégie de décontamination.

Par ailleurs, plusieurs études granulochimiques ont été seulement réalisées sur la fraction fine des sols urbains (Wilhelmy et Daniel, 2002; Silke et Burghardt, 2005; Massadeh et Jaradat, 2006; Wang et al., 2006; Acosta et al., 2008). Cela s'explique par l'argument selon lequel les concentrations de métaux augmentent avec la diminution de la taille des particules (Fortsner, 1980; Al-Rajahi et al., 1996 et Ljung et al., 2006).

Cependant, la fraction grossière, qu'elle soit d'origine naturelle ou anthropique peut avoir un impact sur la concentration des métaux dans le sol (El Khalil et al., 2007; 2008). Par conséquent, une distribution granulométrique grossière serait élaborée dans l'objectif d'étudier la répartition de la concentration des métaux au sein de la fraction grossière des sols urbains formés par remblaiement.

Basée sur la taille des particules, la contribution en métaux constitue l'indice le plus important de contamination (Sutherland, 2003). En effet, c'est un indicateur qui associe la concentration de l'élément trace d'une fraction granulométrique donnée en relation avec la proportion massique de cette fraction étudiée. Ainsi, la contribution réelle exprime le risque global de contamination géochimique en élément trace provenant de chaque fraction granulométrique analysée.

Selon Sutherland (2003), la contribution en métaux lourds est calculée comme suit :

$$CML_j = 100 \times \left[\frac{HM_j \times GS_j}{\sum_{i=1}^n HM_i \times GSi} \right] \quad (1.1)$$

où $j=1, 2, 3, \dots, n$.

CML_j : Contribution en métaux lourds de la fraction granulométrique étudiée j (%).

HM_j : Concentration de l'élément trace correspondant à la fraction granulométrique j étudiée (mg/kg de sol).

GS_j : Proportion massique de la fraction granulométrique étudiée j , qui est comprise entre 0 et 1.

HM_i : Concentration de l'élément trace des différentes fractions granulométriques qui constituent l'échantillon analysé (mg/kg de sol).

GS_i : Proportion massique des différentes fractions granulométriques qui constituent l'échantillon analysé, qui est comprise entre 0 et 1.

Par ailleurs, cet indicateur de contamination a été souvent utilisé pour évaluer le niveau réel en Pb au sein de la granulométrie fine des sédiments urbains (Biggins et Harrison, 1980; Stone et Marsalek, 1996; Sutherland, 2003). En effet, les objectifs de ces études précédentes étaient de mieux quantifier les teneurs réelles de Pb au sein des différentes fractions granulométriques étudiées de la fraction fine afin d'avoir une meilleure représentativité de la contamination.

Problématique, hypothèses et objectifs de cette étude

En résumé, la diversité de matériaux constituant les sols anthropiques combinée à l'hétérogénéité de la contamination impose la mise en place d'une approche multidisciplinaire à l'étude des sites anthropiques urbains. Cette approche est basée sur l'introduction d'une méthodologie spécifique liée à l'étude pédologique de profils de sols urbains formés par remblaiement.

Le développement de la pédologie a abouti à une meilleure connaissance des sols agricoles et forestiers. Toutefois, les milieux anthropiques ont été longtemps délaissés voire ignorés. Afin d'y remédier, plusieurs études pédologiques adaptées à la caractérisation des sols urbains ont été réalisées. Néanmoins, bien qu'elles soient importantes, ces différentes approches pédologiques élaborées ne renseignent pas sur l'identification des phases minéralogiques spécifiques aux matériaux anthropiques qui constituent les sols urbains.

De plus, les sols anthropiques urbains possèdent, à la différence des sols agricoles et naturels, une fraction grossière élevée dont l'étude n'est pas souvent prise en considération. Aussi, la plupart des approches pédologiques déjà réalisées ne se sont pas concentrées sur l'étude de la fraction grossière. Or, la fraction grossière qu'elle soit d'origine naturelle ou anthropique peut avoir un impact sur la concentration totale des métaux dans le sol en milieu urbain (El Khalil et al., 2008).

Ainsi, cette étude vise à élaborer une démarche pédologique à la caractérisation des sols anthropiques urbains formés par remblaiement. Cette approche repose sur l'étude de paramètres pédo-morphologiques décrits sur le terrain et complétés au laboratoire à savoir la profondeur des profils étudiés, la nature, la couleur et la structure des horizons étudiés, et le contenu massique des débris grossiers. Ces paramètres sont accompagnés d'analyses physico-chimiques précises (pH, texture, teneur en carbone organique, carbonates et métaux), couplées aux analyses minéralogiques (diffraction aux rayons X) réalisées au laboratoire. De plus, cette approche pédologique intègre l'étude de la fraction grossière afin de compléter la

caractérisation des sols anthropiques urbains sur la base des concentrations de contaminants. L'objectif est d'avoir une meilleure connaissance des propriétés des sols urbains formés par remblaiement afin de contribuer à mieux gérer les espaces urbains.

Par conséquent, deux hypothèses ont été élaborées dans le cadre de ce projet :

1. Les profils de sols urbains formés par remblaiement peuvent être différenciés en horizons, puis caractérisés à l'aide de paramètres pédo-morphologiques, physico-chimiques et minéralogiques;
2. Souvent négligée durant l'échantillonnage, la fraction grossière constitue une proportion massique significative des sols anthropiques urbains et de ce fait, influence la physico-chimie de ces sols, particulièrement au niveau des teneurs totales de métaux contenues dans les sols urbains.

Aussi, cette étude vise spécifiquement à court terme à :

1. Identifier les différents horizons anthropiques constituant les profils de sols urbains formés par remblaiement,
2. Déterminer des propriétés pédo-morphologiques (nature, épaisseur, couleur et structure des horizons, contenu massique des débris grossiers) et physico-chimiques (pH, texture, teneur en carbone organique, carbonates et métaux) des horizons étudiés,
3. Déterminer à l'aide de la DRX, les phases minéralogiques spécifiques aux différents matériaux anthropiques qui composent les profils étudiés,
4. Identifier à l'aide de la DRX, les phases métallifères au sein des différents horizons anthropiques qui composent les profils étudiés,

5. Établir la distribution granulométrique de la fraction grossière par rapport à la fraction fine tamisée à 2 mm,
6. Étudier la répartition des métaux lourds entre les fractions fines et les fractions grossières correspondantes des différents horizons anthropiques identifiés,
7. Évaluer l'apport réel en métaux lourds des fractions grossières constitutives des différents horizons anthropiques étudiés.

CHAPITRE 2

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Afin de répondre aux objectifs spécifiques énoncés précédemment, une structure méthodologique a été élaborée. Celle-ci est résumée à la figure 2.1. La démarche pédologique adaptée à l'étude des sols urbains formés par remblaiement comprend deux phases. La phase 1 a permis d'étudier des profils de sols anthropiques sur un site contaminé sur le territoire de la ville de Montréal. La phase 2 a permis d'évaluer les teneurs en métaux lourds des fractions grossières des différents horizons anthropiques qui composent les profils étudiés.

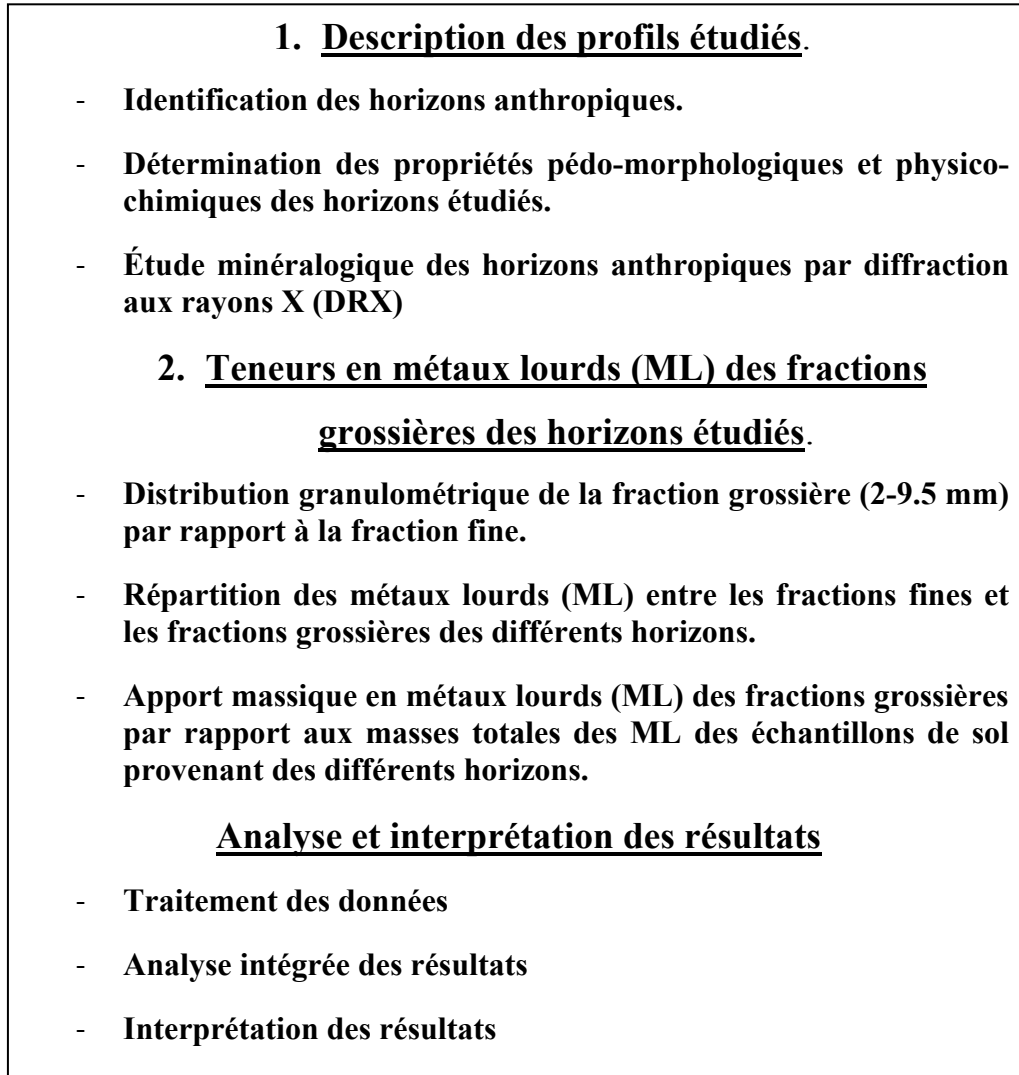


Figure 2.1 Représentation schématique de la structure méthodologique de l'étude

2.1 Présentation du site d'étude

Le site de la cour Glen est situé à Montréal à l'ouest du centre-ville. Il est limité respectivement au nord et à l'est par la jonction Sainte Catherine Ouest et le chemin Glen, au sud par la rue Saint-Jacques Ouest et à l'ouest par le boulevard Decarie (*Voir Figure 2.2, p.27*). Par ailleurs, le site d'étude est à la jonction de la ville de Westmount et des arrondissements Notre-Dame de Grâce et Sud-ouest de la ville. Il couvre une superficie de 172800 m² (Mertenat, 2007).



Figure 2.2 Périmètre de la cour Glen
Tirée de Google Earth (2009)

D'un point de vue historique, c'est durant la fin de la seconde moitié du 19^{ème} siècle, que le site est utilisé pour la première fois à des fins industrielles, avec l'installation d'une briqueterie. Au début du 20^{ème} siècle (1906), Ontario & Quebec Railway achète le terrain à

des fins de construction d'une gare de triage, puis le revend au Canadian Pacific Railway (CP) en 1912. Le CP y construit une rotonde et une plaque tournante ainsi que de nombreuses voies d'entreposage. La gare de triage se caractérise alors par sa connexion aux chemins de fer de Montréal. En somme, la cour Glen servait de centre d'entreposage, d'entretien et de transfert de wagons.

Les activités ferroviaires de la Canadian Pacific ont perduré jusqu'à la vente du terrain en 2001 au gouvernement du Québec, pour la construction du Centre Universitaire de Santé McGill (CUSM).

À cet effet, des travaux de caractérisation environnementale ont été réalisés sur ce site à vocation institutionnelle par plusieurs firmes, à savoir Expert Enviroconseil (2002) puis Qualitas Inc, partenaire industriel du projet. La firme Daniel Arbour & Associés a même réalisé en 2002 une étude du potentiel archéologique du site.

Selon ces études précédentes, la stratigraphie initiale du site d'étude était composée de sols naturels formés de matériaux fins et peu perméables tels que des sables fins, des silts et des argiles formés sur un dépôt d'origine naturelle. Ce dépôt est un till glaciaire silteux-sableux présent partout à Montréal. Par la suite, les différentes activités de construction et d'aménagement réalisées par le CP ont entraîné le remblaiement du site afin d'en obtenir la surface actuelle. Aussi, les remblais rencontrés sur le site d'étude sont constitués de gravier, de sable, de silt, d'argile, de cendres de fonderies, de charbons et de déchets domestiques. L'épaisseur de ces remblais varie de 2 à 15 m (Expert Enviroconseil, 2002).

Le site Glen est un site contaminé. Cette contamination provient essentiellement d'activités ferroviaires passées. Deux types de contaminants y sont rencontrés : les hydrocarbures pétroliers (diésel) et les métaux. Les hydrocarbures pétroliers sont répartis dans le sol et sous la forme mobile au sein de la nappe phréatique. En 2005, le gouvernement a choisi de décontaminer le sol. Ainsi, plus de 950.000 m³ de sol ont été excavés à des fins de traitement hors site.

2.2 Échantillonnage et préparation des échantillons

L'excavation des fosses pédologiques a été effectuée sur une section du site avec l'aide de Qualitas. Le choix de cette section repose sur l'accessibilité et la profondeur d'excavation de la zone. Ainsi, 3 profils pédologiques ont été formés (*Voir Figure 2.2, p.27*).

Seize échantillons de sol répartis sur les 3 profils ont été prélevés. Le prélèvement a été effectué du bas vers le haut, à l'aide d'une truelle, le long de la paroi des profils étudiés. Dans le cadre de ce projet, les échantillons ont été entreposés dans des sachets en PVC. La masse des échantillons fraîchement prélevés variait de 6 à 25 kg sur une base humide. La teneur en eau de chaque échantillon a été déterminée afin de ramener les résultats des analyses chimiques sur une base sèche.

Par la suite, les échantillons de sol ont été désagregés légèrement à l'aide d'un pilon en porcelaine à cause du contenu élevé en débris grossiers. Puis, ils ont été séchés à la température ambiante de la pièce (20-22°C) durant 4 jours. Ensuite, ils ont été repesés avant d'être tamisés à 2 mm. Ainsi, le contenu massique total en débris grossiers a pu être déterminé.

La fraction fine obtenue, décrivant l'ensemble des particules inférieures à 2 mm, a été utilisée à des fins d'analyses physico-chimiques. La fraction grossière (particules > 2mm), a été pesée, puis tamisée à 9.5 mm. Le tamis 9.5 mm a été choisi parce que les appareils d'échantillonnage de laboratoire (c'est-à-dire broyeur planétaire et séparateur rotatif) n'admettent que des particules plus petites que 10 mm.

La réduction de la masse des échantillons de terrain en vue d'obtenir des échantillons représentatifs a été réalisée à l'aide d'un séparateur à chutes combiné à l'usage d'un séparateur rotatif et d'un broyeur. En effet, l'utilisation de ces appareils (séparateur à chutes et séparateur rotatif) vise la réduction de l'erreur de ségrégation et de groupement (ESG) et de l'erreur de matérialisation (EM) qui sont les composantes de l'erreur totale de

l'échantillonnage (ETE). De même, la séquence de broyage optimise la procédure d'échantillonnage des sols en réduisant et en homogénéisant la taille des particules. Cette procédure a pour objectif d'accroître le degré de représentativité des concentrations de paramètres physico-chimiques analysés.

2.3 Phase 1 - Description des profils étudiés

L'objectif de cette phase a été d'abord d'étudier les profils de sols urbains selon une approche pédologique. À cet effet, la caractérisation de ces profils a été effectuée en 3 étapes qui sont l'identification des horizons anthropiques, suivie de la détermination des propriétés pédo-morphologiques et physico-chimiques des horizons composant les profils étudiés. Enfin, une étude minéralogique des horizons anthropiques a été réalisée.

2.3.1 Identification des horizons

L'horizonation des profils étudiés a été déterminée à partir de l'identification des horizons qui constituent le profil étudié. Ainsi, cette étape consiste à mesurer la longueur des différents horizons anthropiques qui composent le profil étudié selon le modèle pédologique actuel : la partie supérieure du sol est considérée comme profondeur 0. De ce fait, les horizons évalués seront inscrits en valeur croissante avec la profondeur.

2.3.2 Détermination des propriétés pédo-morphologiques et physico-chimiques des horizons étudiés

L'ensemble des paramètres analysés est présenté dans le tableau suivant :

Tableau 2.1 Liste des paramètres utilisés

Paramètre	Méthode et/ou instrument	Paramètre	Méthode et/ou instrument
<i>terrain</i>		<i>Laboratoire</i>	
Structure du sol	Visuelle / guide de description de la FAO	pH	Mc Gill GRC/ pH-mètre
<i>Laboratoire</i>		<i>Laboratoire</i>	
Contenu (m/m) en débris grossiers	Tamissage à 2 mm	Carbone Organique Total (COT) solides	CEAEQ MA.405-C1.0/ oxydation au $K_2Cr_2O_7$
Couleur du sol	Code Munsell (<i>washable edition 2010</i>)	Carbonates (solides)	Hesse (1971)/Titration acide
Texture/ Granulométrie fine	Tamissage mécanique/ASTM D 422 Sédimentométrie/ ASTM D422	Métaux (solides)	CEAEQ MA.203-AS1.0/ Spectrophotométrie par torche à plasma induit
Granulométrie grossière	Tamissage mécanique/ASTM D 422	Minéralogie	Diffraction aux Rayons X

2.3.2.1 Structure du sol

L'évaluation de la structure du sol a été effectuée visuellement sur le terrain à l'aide de la classification présentée à la figure 1.3 (*Voir Figure 1.3, p. 12*).

2.3.2.2 Contenu en débris grossiers

Le contenu massique en débris grossiers a été déterminé au laboratoire par un tamisage à 2 mm à partir de la masse totale de l'échantillon sec prélevé.

2.3.2.3 Couleur du sol

Au laboratoire, le code Munsell a permis d'évaluer la couleur du sol à l'état sec à partir de ses 3 composantes (teinte-éclat-saturation). La teinte (Hue) est représentée par le code identifiant la page, tandis que la luminosité ou l'éclat (Value) est une variable passant de 0 (noir) à 10 (blanc). Enfin, la saturation ou l'intensité (Chroma) est la variable qui passe de gris à rouge. Le gris est utilisé comme couleur de référence.

Ainsi, l'interprétation du code Munsell est réalisée comme suit : chaque feuillet du code représente une teinte (Hue). Chaque teinte est constituée de petits rectangles dont la luminosité (Value) est donnée en ordonnée et la saturation (Chroma) en abscisse. Ex : 7.5YR 5/3.

2.3.2.4 Granulométrie-Texture

La distribution granulométrique des particules de sol a été réalisée au laboratoire selon la méthode standard ASTM D422. La granulométrie de la fraction fine a été évaluée au laboratoire par tamisage mécanique et par sédimentométrie. Auparavant, un test de la masse volumique des solides (ρ_s) a été effectué selon la méthode standard BNQ 2501-70 (encore appelée la méthode du pycnomètre).

Ensuite, la texture du sol a été déterminée à l'aide de l'abaque de classes texturales, tiré du système canadien de classification des sols, selon l'évaluation de la proportion de particules de sable et d'argile (*Voir* Figure 1.4, p. 13). La texture des horizons de scories a été déterminée selon les critères spécifiques de classification des scories établis par le Système Canadien de Classification des Sols.

2.3.2.5 Le pH du sol

Les analyses de pH ont été effectuées suivant la méthode McGill GRC, selon un rapport 1:10 afin de simuler les conditions de lixiviation des métaux. Les solutions en suspension ont été agitées selon une durée de 24 h à l'aide d'un agitateur mécanique de marque Shaker modèle 75. Les mesures de pH ont été prises dans les solutions en suspension à l'aide d'un pH-mètre de marque Oakton. Le pH-mètre utilisé a été calibré à l'aide de solutions tampons à pH=7 et pH=10.

2.3.2.6 Contenu en Carbone Organique Total (COT)

Le contenu en COT a été analysé suivant le protocole du CEAEQ (2006). Les échantillons de sol ont été oxydés à l'aide du dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) 1N, puis digérés avec de l'acide sulfurique (H_2SO_4) qui accélère et complète la réaction à 77% d'efficacité (Cescas, 2005). Le dosage par titration en excès a été effectué au $FeSO_4$ 0.5 N. Ainsi, le contenu en Carbone Organique Total (COT) a été calculé comme suit :

$$\% COT = \frac{(A - B) \times 4}{P \times A} \quad (2.1)$$

où COT : concentration de carbone organique total (%).

A : volume de sulfate de ferreux ($FeSO_4$) utilisé pour le témoin (ml).

B : volume de sulfate de ferreux ($FeSO_4$) utilisé pour l'échantillon (ml).

P : masse de l'échantillon de sol sec (g).

4 : facteur de conversion.

2.3.2.7 Contenu en carbonates (CaCO_3)

Les échantillons de sol ont été digérés avec l'acide chlorhydrique (HCl) 1M, en présence de quelques gouttes de Bleu de Bromothymol (BBT) suivant la méthode de Hesse (Hesse, 1971). Le dosage par titrage a été effectué avec de l'hydroxyde de sodium (NaOH) 1M. Ainsi, le contenu en carbonates a été calculé comme suit :

$$\% \text{CaCO}_3 = (A-B) \times 5 \quad (2.2)$$

où % CaCO_3 : contenu en carbonates (équivalents de CaCO_3).

A : volume d'hydroxyde de sodium (NaOH) titré pour le témoin (ml).

B : volume d'hydroxyde de sodium (NaOH) titré pour l'échantillon (ml).

5 : facteur de conversion.

2.3.2.8 Contenu en métaux

Les métaux ont été analysés selon le protocole standard du CEAEQ (2005). Les solutions étalons ont été préparées avec de l'eau nanopure combinée à 10% HCl et 5% HNO_3 à l'exception du blanc (témoin). Les solutions de digestion HNO_3 (50%) et HCl (20%) ont été préparées avec de l'eau distillée.

Les échantillons de sol ont été séchés à 105°C , broyés, puis tamisés à $212\ \mu\text{m}$ avant d'être digérés avec 4 ml de HNO_3 (50%) combinés à 10 ml de HCl (20%). Le dosage a été effectué avec un spectrophotomètre par torche à plasma induit ICP-OES de marque Vista-MPX. Un échantillon d'eau distillée a été ajouté pour rinçage après chaque série d'échantillons dosés au plasma.

Les métaux suivants ont été mesurés sur la fraction fine des échantillons : le Cu, le Mn, le Pb et le Zn. Les limites de détection de ces éléments traces métalliques étaient respectivement de 0.3, 0.03, 1 et $0.1\ \mu\text{g/l}$.

Ainsi, le contenu en métaux a été calculé comme suit :

$$D = \frac{(A-T) \times B}{C} \times F \quad (2.3)$$

- où
- D : concentration du métal dans l'échantillon (mg/kg).
 - A : concentration du métal dans la solution dosée (mg/l).
 - T : concentration du métal dans le témoin (mg/l).
 - B : volume final de l'échantillon (50 ml).
 - F : facteur de dilution si nécessaire.
 - C : poids de l'échantillon exprimé une base sèche (1g de sol).

2.3.3 Étude minéralogique des horizons anthropiques

Les analyses minéralogiques ont été réalisées par diffraction aux rayons X (DRX). L'utilisation de la DRX vise à déterminer des indicateurs minéralogiques spécifiques aux matériaux anthropiques qui composent les profils étudiés. De plus, l'utilisation de la DRX vise aussi à mettre en évidence les phases métallifères (c'est-à-dire les minéraux susceptibles de contenir des éléments traces métalliques) des différents horizons qui composent les profils de sols urbains étudiés.

Les analyses minéralogiques ont été réalisées à l'extérieur de l'ÉTS, précisément au laboratoire minéralogique de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT). Toutefois, pour des raisons de coûts financiers liés au projet, les analyses minéralogiques par DRX ont été seulement effectuées sur la fraction fine des échantillons de sol du profil 1, des horizons de surface des profils 2 et 3 et des 2 horizons de scories du profil 3.

2.4 Phase 2- Teneurs en métaux lourds des fractions grossières des différents horizons anthropiques étudiés

L'objectif général de cette phase a été d'évaluer les teneurs en métaux lourds des fractions grossières constitutives des différents horizons anthropiques qui composent les profils étudiés.

Cette phase comporte principalement 3 étapes. D'abord la distribution granulométrique de la fraction grossière des particules (2-9.5 mm) a été réalisée par rapport à la fraction fine, suivie d'une répartition des métaux entre les fractions fines et grossières. Enfin, l'apport massique en métaux de la fraction grossière (2-9.5 mm) a été évalué par rapport aux masses totales des éléments traces contenues dans les échantillons provenant des horizons anthropiques étudiés.

2.4.1 Distribution granulométrique de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport à la fraction fine tamisée à 2 mm

Afin d'étudier la répartition des métaux au sein de la fraction grossière des différents horizons étudiés, une distribution granulométrique complète de la fraction grossière a été réalisée par rapport à la fraction fine.

Ainsi, la fraction grossière (2-9.5 mm) nouvellement pesée a été répartie sur 3 tamis : 2 mm, 4.75 mm et 6.3 mm. Le tamisage a été effectué de façon mécanique à l'aide d'un tamiseur de type ROTAP, modèle RX-29. De ce fait, 15 échantillons ont été tamisés à l'exception de l'échantillon 5 du profil 1 qui n'avait pas de débris grossiers. La durée d'agitation était de 10 mn, conforme au protocole ASTM D422.

2.4.2 Répartition des métaux lourds entre les fractions fines et les fractions grossières des différents horizons anthropiques

Les analyses de métaux ont été effectuées selon le protocole MA.203-AS1.0 du CEAEQ. L'échantillonnage de la fraction grossière représentative a été réalisé à l'aide du séparateur rotatif combiné à l'usage du broyeur. Auparavant, un lavage à l'eau chaude suivi d'un séchage à 105°C a été effectué auparavant sur chaque fraction grossière étudiée, tel que suggéré par El Khalil et al. (2008). L'objectif était d'éliminer les particules de sol adhérentes aux particules grossières afin de mieux évaluer leur contenu réel en éléments traces.

Ainsi pour les 15 horizons étudiés, la distribution des métaux entre les fractions fines et grossières a été effectuée. Les métaux analysés ont été le Cu, le Mn, le Pb et le Zn.

2.4.3 Apport massique en métaux de la fraction grossière (2-9.5 mm) des différents horizons anthropiques étudiés

Les concentrations de métaux obtenues dans les différentes fractions granulométriques précédemment analysées sont exprimées en mg/kg de sol. Or, les fractions granulométriques étudiées représentent les différentes proportions massiques d'un échantillon de sol, d'où l'importance de réévaluer ces résultats sur une base granulométrique afin de mieux exprimer les teneurs réelles en métaux provenant de chaque fraction granulométrique analysée (Sutherland, 2003). Cela exprime la teneur pondérale du métal analysé.

Ainsi, la teneur pondérale d'un métal issue d'une fraction granulométrique étudiée a été obtenue en multipliant la concentration du métal analysé (mg/kg de sol) par la proportion massique que représente cette fraction granulométrique étudiée par rapport à l'échantillon de sol prélevé.

Par la suite, l'apport massique d'un métal provenant de la fraction grossière (2-9.5 mm), toutes tailles confondues a été déterminé selon le rapport entre la somme des teneurs pondérales (ou masses réelles) du métal issues des différentes fractions granulométriques comprises entre 2 et 9.5 mm et la masse totale du même métal contenue dans l'échantillon prélevé, exprimée en mg/kg de sol sec. Cette dernière a été obtenue par la somme des teneurs pondérales (ou masses réelles) en métal de chaque fraction granulométrique étudiée, incluant la fraction fine analysée.

Par exemple, soit une particule de sol de taille x de l'horizon (55-80 cm) d'un profil étudié. Les fractions fine, (2-4.75 mm), (4.75-6.3mm) et (6.3-9.5 mm) de l'horizon étudié représentent des proportions massiques respectives de 48.1%, 20.55%, 16.75 % et 14,6% de l'échantillon prélevé et tamisé à 9.5 mm. Ces proportions ont été obtenues durant la distribution granulométrique de la fraction grossière (2-9.5 mm) réalisée précédemment par rapport à la fraction fine. La fraction grossière (2-9.5 mm) représente la somme de toutes les fractions grossières étudiées comprises entre 2 et 9.5 mm.

Les teneurs en Cu analysées précédemment dans les 4 fractions granulométriques étudiées sont respectivement 208.8 ppm, 303.1 ppm, 123.16 ppm et 145.75 ppm. Ainsi, les teneurs pondérales de Cu provenant des différentes fractions granulométriques étudiées de cet échantillon sont respectivement de 100.4, 62.3, 20.63 et 21.3 mg/kg de fraction granulométrique. La masse totale de Cu contenue dans l'échantillon prélevé est de 204.63 mg/kg de sol sec. Par conséquent, l'apport massique en Cu de la fraction grossière (2-9.5 mm), toutes tailles confondues représente 50.9 % de la masse totale de ce métal contenue dans l'échantillon prélevé et tamisé à 9.5 mm et ce, pour une fraction grossière (2-9.5 mm) estimée à 52%.

2.5 Contrôle et qualité des analyses

Le contrôle et la qualité des résultats reposent d'abord sur le choix d'une procédure d'échantillonnage de sols qui permet de contrôler la représentativité des échantillons en prévision des analyses, tel que décrit dans la section 2.2.

De plus, de l'eau distillée-déionisée et des produits chimiques de haute qualité (grade réactifs) (Anachemia Inc., Fisher Scientific) ont été utilisés pour l'ensemble des analyses réalisées. Toutes les analyses chimiques ont été effectuées en triplicats, combinées à l'utilisation de blancs (témoins) à chaque série d'analyse. Par ailleurs, une balance de précision à 4 chiffres de marque METTLER AT 261 Delta Range a été utilisée afin de s'assurer de la précision de la masse des échantillons de sol pesés.

Les analyses physico-chimiques ont été effectuées dans un délai d'environ 5 mois suivant l'obtention des échantillons de sol. La procédure de rinçage de la vaisselle comprenait un lavage à l'eau du robinet et à l'eau savonneuse, accompagnée de 3 rinçages successifs (eau distillée, acide nitrique dilué 10% et eau distillée).

Enfin, la qualité des analyses de métaux était basée sur l'utilisation exclusive des courbes de calibrage linéaire avec des erreurs relatives de 12%. Seuls 2 cas de non-linéarité ont été observés, ayant entraîné deux dilutions nécessaires.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS-DISCUSSION

3.1 Phase 1- Description des profils étudiés

3.1.1 Présentation sommaire des résultats

La figure 3.1 présente les trois profils étudiés.

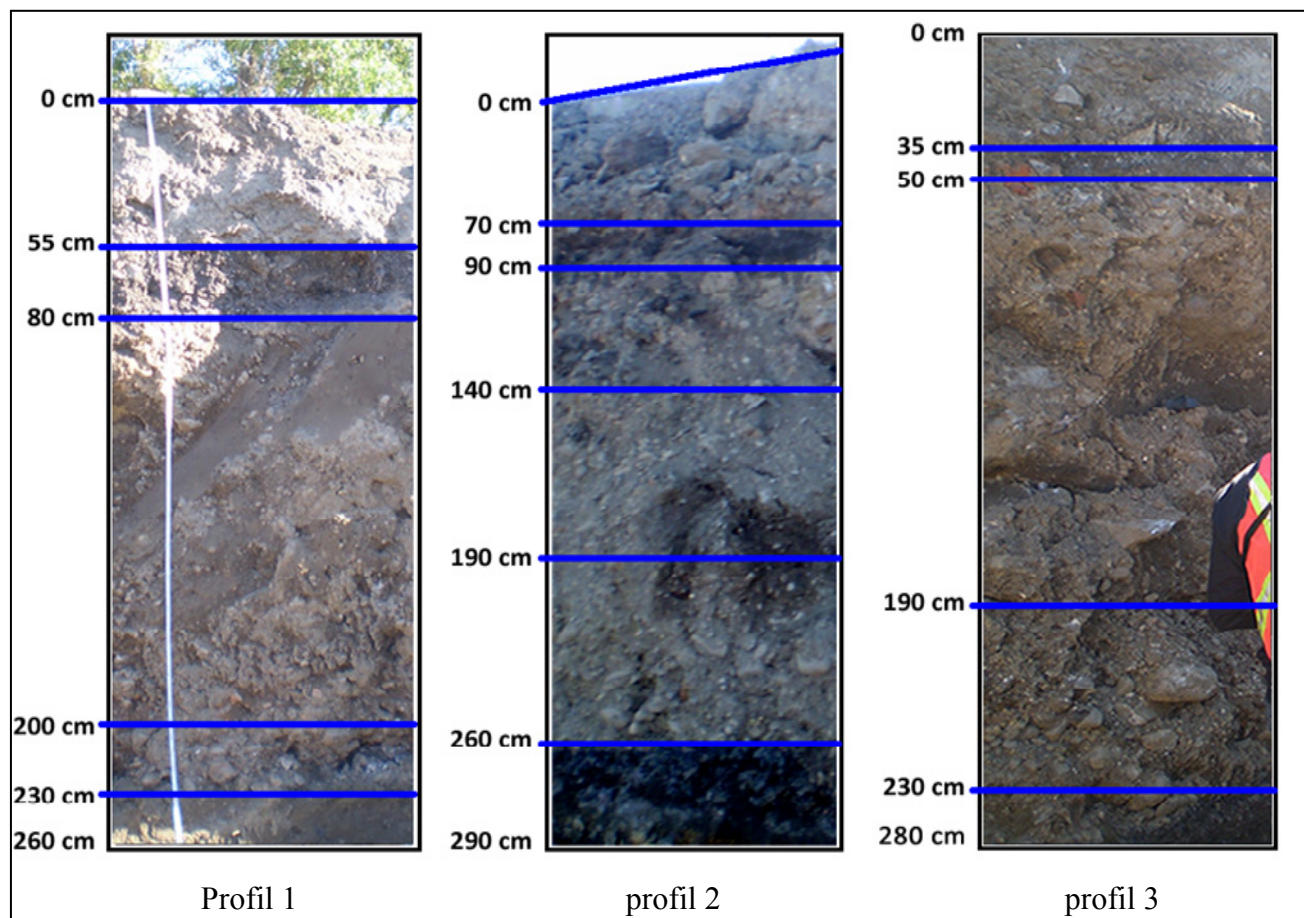


Figure 3.1 Profils pédologiques étudiés

Les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 présentent les descriptions pédologiques des profils 1, 2 et 3.

Tableau 3.1 Description pédologique du profil 1

Paramètres pédo-morphologiques (Observation visuelle)				Paramètres physico-chimiques et minéralogiques (Analyses de laboratoire)							
Prof	Nature et % de débris grossiers	Structure	Couleur	pH	Granulométrie			Texture	C _{org} (%)	Carbonates (% éq CaCO ₃)	Minéralogie
					A	S	S				
0-55 cm	(Débris de construction et fragments de roche 55.55%)	massive	Marron (2.5Y4/3)	8.02	3	8.5	88.5	sable	0.96	19	Tectosilicates ¹ Phyllosilicates ² Calcite Actinolite ³ Rutile
55- 80 cm	Scories (79.75%)	Single grain	Noir (2.5Y3/2)	7.22	-	-	-	scoriacée	2.04	4.34	Tectosilicates aragonite Phyllosilicates pyrite Actinolite
80- 200 cm	Fragments de roche (39.9%)	massive	Marron (7.5 YR5/6)	8.17	2.2	5.1	92.7	sable	0.24	5.75	Tectosilicates Phyllosilicates Actinolite
200- 230 cm	Fragments de roche (63.24%)	énorme	Marron (10YR4/4)	8	3	8.5	88.5	sable	0.93	16.2	Tectosilicates Phyllosilicates enstatite ⁴ Actinolite - Calcite
230- 260 cm	Absence totale de débris	étalée	Marron (2.5Y 4/3)	7.86	3	4	93	sable	1.35	5.67	Tectosilicates Phyllosilicates Actinolite Rutile Dolomite Pyrite- Chalcopyrite

¹ Le groupe des tectosilicates comprend le quartz, l'anorthite, l'albite et les orthoclases.

² Le groupe des phyllosilicates comprend la muscovite (mica blanc) et les chlorites.

³ L'actinolite est un silicate ferromagnésien.

⁴ L'enstatite est un inosilicate.

Tableau 3.2 Description pédologique du profil 2

Paramètres pédo-morphologiques (Observation visuelle)				Paramètres physico-chimiques et minéralogiques (Analyses de laboratoire)							
Prof	Nature et % de débris grossiers	Structure	Couleur	pH	Granulométrie			Texture	C _{org} (%)	Carbonates (% CaCO ₃)	Minéralogie
					A	S	S				
0-70 cm	(Débris de construction et fragments de roche 59.72%)	massive	Foncée (2.5Y4/2)	8.14	4.5	4.5	91	Sable	1.8	21.2	Tectosilicates Phyllosilicates Enstatite Calcite Actinolite
70-90 cm	Scories (42.5%)	Single grain	Noire (5Y2.5/1)	7.75	-	-	-	cendreuse	5.16	8.5	
90-140 cm	Fragments de roche (59.35%)	massive	Marron (10 YR 4/3)	8.25	3	10	87	Sable	0.57	5.75	
140-190 cm	Fragments de roche (70.58%)	énorme	Marron foncé (10YR 4/4)	8.18	3.5	6.5	90	Sable	0.47	10.34	
190-260 cm	Fragments de roche (70.82%)	énorme	Marron foncé (10 YR 4/4)	8.23	2	6	92	Sable	0.65	10.83	
260-290 cm	Scories (69.09%)	Single grain	Noire avec qqes teintes rougeâtres (2.5 YR 2.5/1)	7.72	-	-	-	scoriacée	3.03	3.84	

Tableau 3.3 Description pédologique du profil 3

Paramètres pédo-morphologiques (Observation visuelle)				Paramètres physico-chimiques et minéralogiques (Analyses de laboratoire)							
Prof	Nature et % de débris grossiers	Structure	Couleur	pH	Granulométrie			Texture	C _{org} (%)	Carbonates (% éq CaCO ₃)	Minéralogie
					A	S	S				
0-35 cm	(Débris de construction et fragments de roche 50.88%)	étalée	Gris (10YR 3/1)	7.98	2.5	12	85.5	Sable loameux	2.95	12.2	Tectosilicate Phyllosilicate Calcite- Ankerite Actinolite
35-50 cm	Scories (55.99%)	étalée	Noir (7.5Y3/1)	7.34	-	-	-	scoriacée	3.64	1	Tectosilicate Phyllosilicate Actinolite- Pyrite
50-190 cm	Fragments de roche (64.8%)	énorme	Jaune foncée (10YR6/8)	8.08	4	9	87	Sable loameux	0.86	8.84	
190-230 cm	Fragments de roche (74.02%)	énorme	Marron sombre (10 YR4/4)	8.11	2	7.7	90.3	Sable	0.48	11.84	
230-280 cm	Scories (70.97%)	étalée	Noire (10YR 2/1)	7.67	-	-	-	scoriacée	2.5	7.5	Tectosilicate Phyllosilicate Rutile Actinolite- Pyrite

Les figures 3.2 et 3.3 montrent la distribution des teneurs en C_{org} pour les 3 profils étudiés.

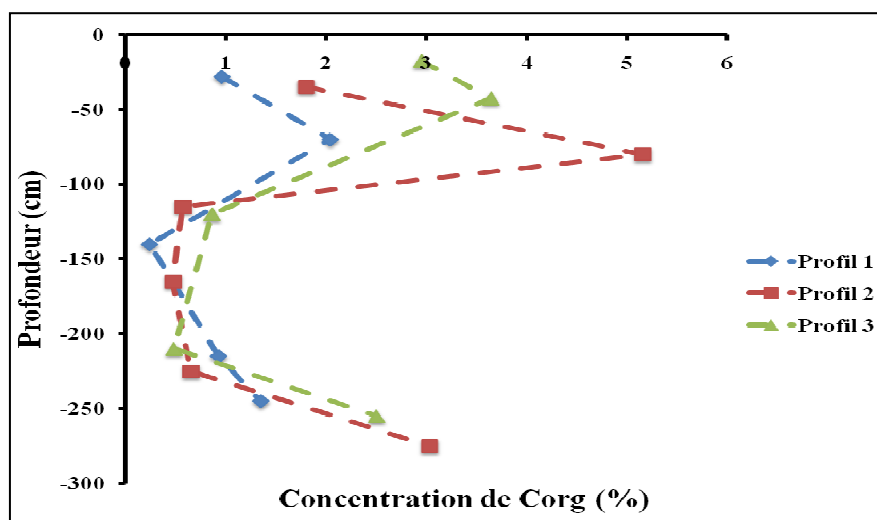


Figure 3.2 Distribution des teneurs en Carbone organique selon la profondeur du sol pour les 3 profils

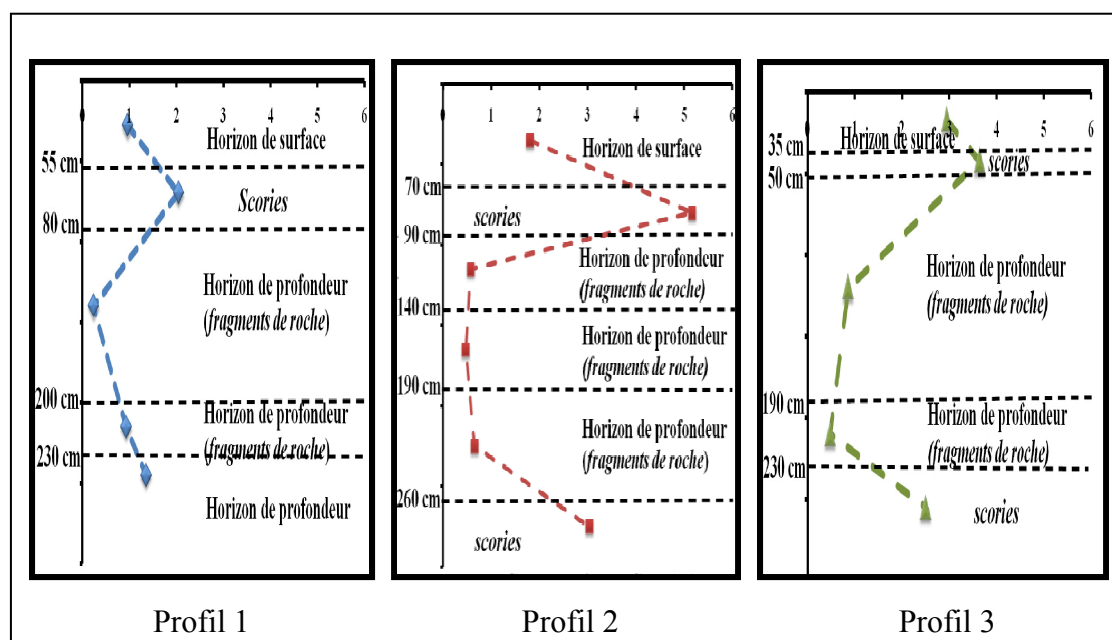


Figure 3.3 Distribution des teneurs en Carbone organique selon les différents horizons anthropiques des 3 profils

Le tableau 3.4 présente les contenus massiques en débris grossiers en relation avec les teneurs en carbone organiques des horizons anthropiques des trois profils.

Tableau 3.4 Relation entre le contenu massique en Débris Grossiers (D.G) et les teneurs en C_{org} évaluées des horizons de surface et de profondeur des 3 profils étudiés

Profil 1		Profil 2		Profil 3	
% D.G	% C _{org}	%D.G	% C _{org}	% D.G	% C _{org}
55.55	0.96	59.72	1.8	50.88	2.95
39.9	0.24	59.35	0.57	64.8	0.86
63.24	0.93	70.58	0.47	74.02	0.48
0	1.35	70.82	0.65	r=-0.96	
r= -0.41		r=-0.55			

Le tableau 3.5 présente la relation entre le pH et le contenu en carbonates ($CaCO_3$) pour les trois profils étudiés.

Tableau 3.5 Relation entre le pH et le contenu en $CaCO_3$ pour les 3 profils étudiés

Profil 1		Profil 2		Profil 3	
pH	eq $CaCO_3$	pH	eq $CaCO_3$	pH	eq $CaCO_3$
8.02	19	8.14	21.2	7.98	12.2
7.22	4.34	7.75	8.5	7.34	1
		8.25	5.75		
8.17	5.75	8.18	10.34	8.08	8.84
8	16.2	8.23	10.83	8.11	11.84
7.86	5.67	7.72	3.84	7.67	7.5
r=0.45		r=0.38		r=0.91	

Les figures 3.4, 3.5 et 3.6 présentent les analyses de métaux effectuées dans les trois profils.

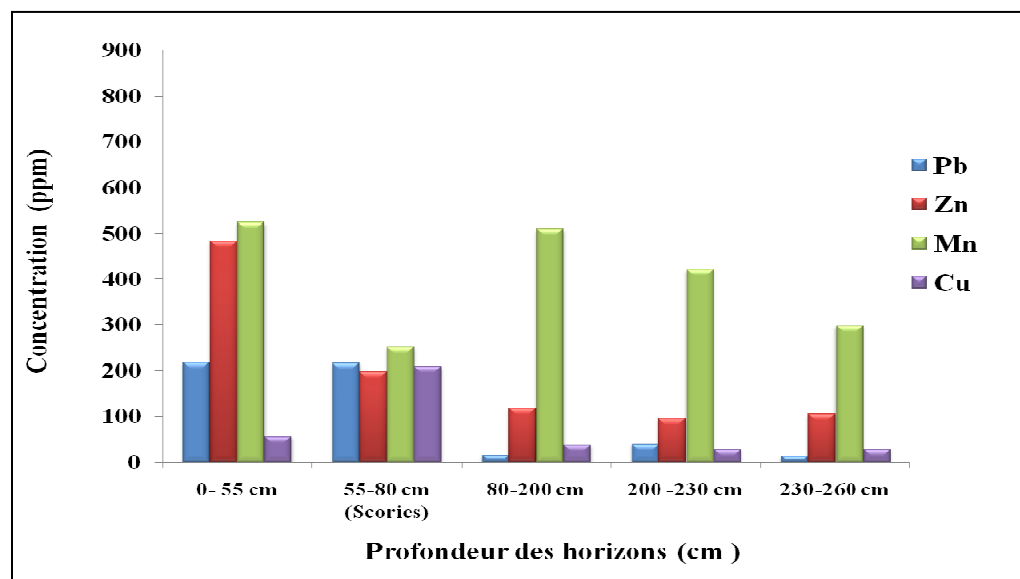


Figure 3.4 Étude des métaux dans le profil 1 (Fraction fine)

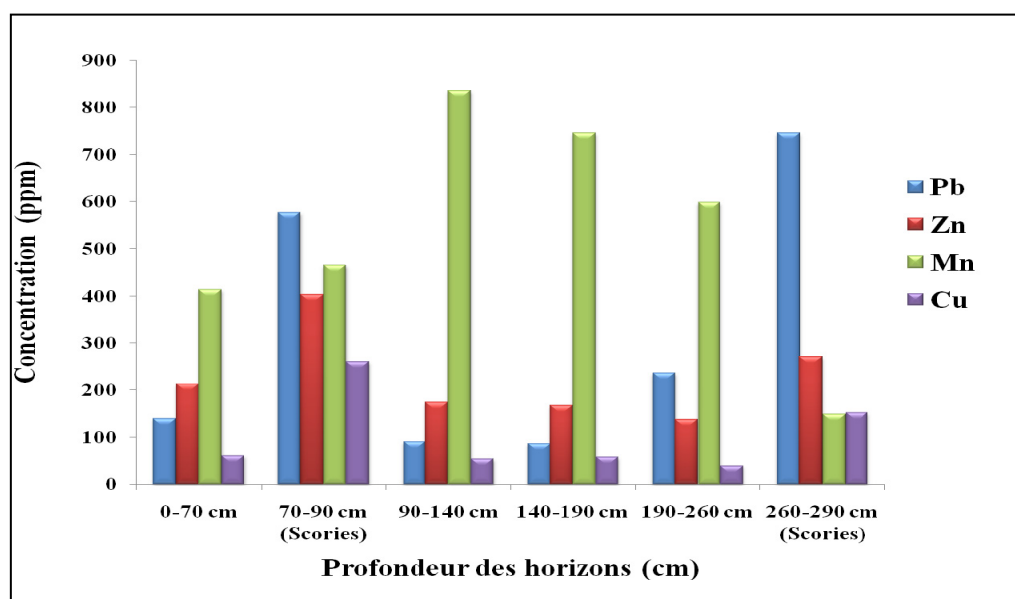


Figure 3.5 Étude des métaux dans le profil 2 (Fraction fine)

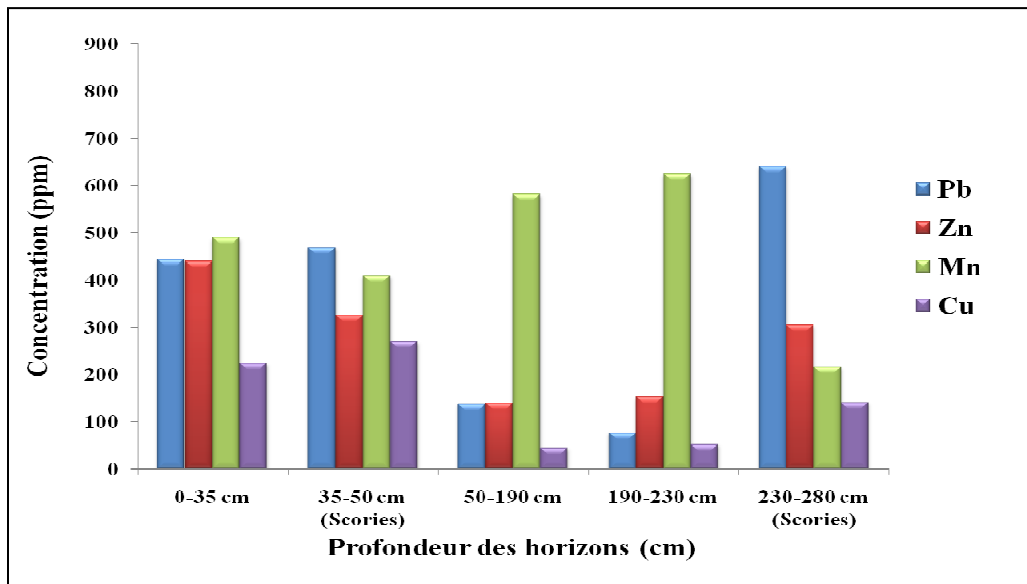


Figure 3.6 Étude des métaux dans le profil 3 (Fraction fine)

3.1.2 Analyse et discussion des résultats

3.1.2.1 Identification et nature des horizons anthropiques

La figure 3.1 montre les trois profils étudiés (*Voir* Figure 3.1, p. 41). L'horizonation des profils a d'abord été évaluée par observation visuelle à partir des différents matériaux identifiés constituant le profil étudié.

Le profil 1 s'étend sur une profondeur de 260 cm. Il comprend 5 horizons (*Voir* Figure 3.1, p. 41). L'horizon de surface a une profondeur de 55 cm. Il contient un mélange de matériaux de construction et de fragments de roche. L'horizon (55-80 cm) est formé principalement de scories. Les horizons (80-200 cm) et (200-230 cm) contiennent essentiellement des fragments de roche.

L'horizon (230-260 cm) ne possède pas de débris grossiers (*Voir* Figure 3.1, p. 41). L'absence de débris grossiers dans cet horizon indiquerait la présence d'un sol initial avant les activités successives de remblaiement. En effet, Puskàs et Farsang (2008) affirment que l'absence de débris grossiers dans les horizons en milieu urbain constitue un signe minimal de perturbation, ce qui signifie que les conditions originelles du sol auraient été préservées.

Le profil 2 est constitué de 6 horizons répartis sur une profondeur de 290 cm (*Voir* Figure 3.1, p. 41). L'horizon de surface a une profondeur de 70 cm et contient un mélange de débris grossiers similaire à l'horizon de surface du profil 1 : fragments de roche et débris de construction. Le profil 2 possède 2 horizons de scories respectivement aux profondeurs (70-90 cm) et (260-290 cm) (*Voir* Figure 3.1, p. 41). Les 3 autres horizons de profondeur (90-140 cm), (140-190 cm) et (190-260 cm) contiennent essentiellement des fragments de roche.

Quant au profil 3, il possède une profondeur de 280 cm (*Voir* Figure 3.1, p. 41). Il est constitué de 5 horizons. L'horizon de surface a une profondeur de 35 cm, et contient lui aussi un mélange de débris grossiers similaire aux deux horizons de surface étudiés précédemment : fragments de roche et débris de construction. Tout comme le profil 2, le profil 3 possède 2 horizons de scories respectivement aux profondeurs (35-50 cm) et (230-280 cm). Les 2 horizons de profondeur (50-190 cm) et (190-230 cm) sont principalement composés de fragments de roche (*Voir* Figure 3.1, p. 41).

D'après les observations effectuées, les trois profils de sol urbain étudiés se caractérisent par une succession marquée d'horizons. Ces horizons sont principalement composés de trois types de matériaux hétérogènes qui sont les débris de construction, les scories et les fragments de roche.

Les matériaux rencontrés proviennent d'activités passées de remblaiement réalisées sur le site d'étude. À cet effet, Schwartz *et al.* (2000, p.141) puis Norra *et al.* (2008, p. 12) affirment que la nature des matériaux qui composent les sols anthropiques urbains dépend essentiellement des activités industrielles passées qui se sont déroulées sur le site.

3.1.2.2 Détermination des propriétés pédo-morphologiques et physico-chimiques des horizons étudiés.

3.1.2.2.1 Contenu en débris grossiers

Le tableau 3.1 résume la description pédologique du profil 1 (*Voir* Tableau 3.1, p. 42). Le contenu minimum en débris grossiers est de 39.9% dans l'horizon (80-200 cm), constitué de fragments de roche, tandis que le contenu maximum est de 79,7 % dans l'horizon de scories (55-80 cm), soit une moyenne de 47.7%.

Le tableau 3.2 résume la description pédologique du profil 2 (*Voir* Tableau 3.2, p. 43). Le contenu minimum en débris grossiers est de 42.5 % dans l'horizon de scories (70-90 cm), tandis que le contenu maximum est de 70.8% dans l'horizon (190-260 cm), composé de fragments de roche, soit une moyenne de 62% de débris grossiers.

Le tableau 3.3 résume la description pédologique du profil 3 (*Voir* Tableau 3.3, p. 44). Le contenu minimum en débris grossiers est de 50.8 % dans l'horizon de surface (0-35 cm) alors que le contenu maximum est de 74% dans l'horizon (190-230 cm) composé de fragments de roche, soit une moyenne de 63% de débris grossiers.

En somme, les 3 profils étudiés possèdent des contenus moyens en débris grossiers supérieurs à plus de 50%, ce qui est élevé. Par exemple, les contenus maximum en débris grossiers des profils de sol de la ville de Szeged étaient de 23.1 % et 23.7% selon Puskas et Farsang (2008). À cet effet, plusieurs études réalisées démontrent que le contenu massique élevé en débris grossiers constitue un indicateur clé de caractérisation des sols anthropiques urbains (Craul, 1985; Puskas et Farsang, 2008).

3.1.2.2.2 Structure des sols

Le profil 1 se caractérise par une différence marquée de structure entre ses horizons (*Voir* Tableau 3.1, p. 42). En effet, l'horizon de surface (0-55 cm) et l'horizon (80-200 cm) ont une structure massive tandis que l'horizon de scories (55-80 cm), possède une structure de type "single grain". Les horizons de profondeur (200-230 cm) et (230-260 cm) possèdent des structures respectivement énormes et étalée.

La structure "single grain" est définie comme une structure composée de particules non agrégées (FAO, 2006). La structure "étalée" est une structure composée de particules fines cohérentes. La structure "massive" se réfère à une structure essentiellement composée de sol et d'éléments grossiers. La différence entre la structure massive et la structure énorme se situe principalement dans le contenu massique en fragments grossiers. En effet, une structure énorme est une structure massive avec un contenu plus élevé en fragments grossiers.

Le profil 2 se caractérise par une différence peu marquée de structure par rapport au profil 1 (*Voir* Tableau 3.2, p. 43). En effet, les horizons de scories possèdent des structures single grain tandis que les autres horizons anthropiques ont des structures massive et énorme. Quant au profil 3, il est composé d'horizons à structure énorme et étalée, incluant les horizons de scories (*Voir* Tableau 3.3, p. 44).

Ainsi, à l'exception du profil 1, les deux autres profils analysés se caractérisent par des différences peu marquées de structures contrairement à d'autres études précédemment réalisées où les profils de sols urbains se caractérisent essentiellement par des variations abruptes de structure (Puskàs et Farsang, 2008; Norra et al., 2008).

Toutefois, selon la classification visuelle présentée à la figure 1.3, le point commun des structures étudiées est qu'elles se caractérisent par l'absence d'un processus d'agrégation des particules de sol, contrairement aux horizons naturels où les structures de sol rencontrées résultent d'un processus d'agrégation des particules de sol de nature biotique ou abiotique

(Voir Figure 1.3, p. 12). Ainsi, la formation des horizons rencontrés sur ce site urbain ne résulte pas d'une activité pédologique naturelle mais anthropique : le remblaiement, d'où la typologie de structure observée à travers les trois profils étudiés.

Par ailleurs, Craul (1985) explique que la formation de la structure des sols en milieu urbain est fonction de deux principaux facteurs qui sont d'abord, la présence d'un contenu élevé en débris grossiers solides qui selon lui, modifie la structure du sol en réduisant l'espace poral, particulièrement les macropores. Ensuite, la faiblesse importante du contenu en matière organique défavorise le processus d'agrégation des particules de sol. Par conséquent selon l'auteur, les effets agrégateurs de l'activité biologique des organismes du sol, s'en trouvent considérablement réduits dans ces types de sols.

3.1.2.2.3 Couleur des sols

La couleur du sol du profil 1 est essentiellement marron, à l'exception de l'horizon de scories (55-80 cm) où la couleur est noire (Voir Tableau 3.1, p. 42). L'étude des horizons du profil 2 révèle la présence de diverses couleurs allant du foncé (dans l'horizon de surface), au marron, en passant par le marron foncé. Les horizons de scories possèdent une couleur noire, avec quelques teintes rougeâtres supplémentaires pour l'horizon de scories (260-290 cm) (Voir Tableau 3.2, p. 43).

L'étude du profil 3 confirme clairement cette diversité de couleur. En effet, les horizons de ce profil ont des couleurs qui vont du gris au marron, en passant par le jaune et le noir pour les horizons de scories (Voir Tableau 3.3, p. 44).

En résumé, l'analyse de la couleur du sol au sein des 3 profils démontre clairement que les horizons anthropiques étudiés se caractérisent par des variations abruptes de couleurs qui résultent de l'hétérogénéité des matériaux constitutifs de ces profils. D'autres chercheurs affirment cette idée (Puskàs et Farsang, 2008; Norra et al., 2008).

Par ailleurs, la couleur du sol constitue un indicateur de caractérisation des sols urbains dans la mesure où ce paramètre a permis clairement de confirmer l'identification des différents matériaux qui composent les profils étudiés. Par exemple, la présence d'une couleur marron dans les horizons de profondeur des 3 profils provient généralement des matériaux formés de fragments de roche. De plus, la couleur noire observée dans les horizons de scories s'explique car les scories proviennent de résidus de combustion.

Norra et al. (2008) ont aussi observé des différences au niveau de l'état de la couleur du sol dans les profils de sol naturel et les profils de sols anthropiques de la ville de Qingdao. Selon les chercheurs, des modifications abruptes de couleurs ont été observées dans les horizons des sols anthropiques, par rapport aux sols naturels où la coloration des horizons était assez similaire. Ainsi, la couleur du sol constitue un indicateur d'anthropisation des sols urbains, dans la mesure où elle évalue le degré de perturbation d'un profil de sol urbain par rapport à son état naturel initial.

3.1.2.2.4 Texture des sols

Selon l'abaque de classes texturales tiré du Système Canadien de Classification des Sols (*Voir* Figure 1.4, p. 13), les horizons de sol qui constituent les 3 profils étudiés possèdent essentiellement une texture sableuse. À cet effet, Puskàs et Farsang (2008) affirment que les horizons anthropiques formés par les activités de remblaiement se caractérisent généralement par des textures à dominance sableuse ou sableux-loameux.

En effet, le pourcentage moyen des particules de sable dans le profil 1 est de 90.6% avec un minimum de 88.5% et un maximum de 93% (*Voir* Tableau 3.1, p. 42). Le profil 2 possède un pourcentage moyen de particules de sable de 90% de sable avec un minimum de 87% et un maximum de 92% (*Voir* Tableau 3.2, p. 43). Quant au profil 3, il possède un pourcentage moyen de particules de sable de 87.6% avec un minimum de 85.5% et un maximum de 90.3% (*Voir* Tableau 3.3, p. 44). Le pourcentage moyen des particules de sables est plus faible dans le profil 3 par rapport aux deux profils précédents car l'horizon de surface (0-35

cm) et l'horizon de profondeur (50-190 cm) du profil 3 possèdent un contenu en silt est plus élevé, (*Voir* Tableau 3.3, p. 44). Par ailleurs, les horizons de scories possèdent essentiellement une texture scoriacée selon le Système Canadien de Classification des Sols.

La détermination de la texture des horizons anthropiques de sol en milieu urbain repose généralement sur l'utilisation d'abaques de classes texturales du guide canadien de classification, inspiré du modèle USDA (Jim, 1997; Puskàs et Farsang, 2008; Norra et al., 2008). Or, cette classification spécifique aux sols agricoles et naturels, est basée sur une analyse granulométrique limitée à la fraction fine, c'est-à-dire aux particules inférieures à 2 mm. Ainsi, la fraction grossière n'est pas considérée. Cela crée un biais au niveau de la distribution granulométrique des particules de sol en milieu urbain, dans la mesure où la proportion élevée des particules grossières qui composent les sols urbains n'est pas considérée.

De même, la détermination de la texture des horizons de scories n'est basée que sur l'utilisation des termes "scoriacée" ou "cendreux" du même guide. Aussi, une détermination de la distribution granulométrique des particules fines de scories a été tentée, mais n'a pas été complètement réalisée à cause du test de sédimentométrie qui n'a pu être appliqué. En effet, le test de sédimentométrie qui évalue la distribution des particules inférieures à 74 μm repose sur la loi de Stokes qui stipule que les particules doivent avoir une masse volumique des solides (ρ_s) autour de 2.65 g/cm^3 . Or les particules de scories, de nature organique, avaient une densité de solides (ρ_s) inférieure à 2.2 g/cm^3 d'où l'importance de réaliser des analyses granulométriques complètes et mieux adaptées à l'étude des sols urbains, incluant la fraction grossière et d'autres matériaux anthropiques spécifiques (scories, par exemple).

Par conséquent, d'autres modèles de classification ou techniques de mesures de la granulométrie intégrant la fraction grossière (ex. ASTM, diffractométrie au Laser) ou la technique de dispersion ultrasonique, comme outil de distribution granulométrique des particules organiques, telle que pratiqué par Gregory et al. (1988) devraient être testés au laboratoire.

3.1.2.2.5 Contenu en Carbone Organique Total (COT)

Le profil 1 possède des concentrations minimum et maximum en carbone organique total respectives de 0.2% et 2%, soit une moyenne de 1.1% (*Voir* Tableau 3.1, p. 42). Le profil 2 possède un contenu minimum en COT de 0.47% et un maximum de 5.1%, soit une moyenne de 1.95% (*Voir* Tableau 3.2, p. 43). Le profil 3 se caractérise par un contenu minimum de 0.48% et un maximum de 3.6%, soit une moyenne de 2.1% (*Voir* Tableau 3.3, p. 44).

Par ailleurs, le faible contenu en carbone organique total constitue un indicateur clé de caractérisation des sols urbains (Puskàs et Farsang, 2008). De plus, les profils étudiés peuvent être classés en catégories extrêmement pauvre (< 1%) ou pauvre (1-2 %) selon leur niveau en Carbone Organique Total (COT) (Sponagel et al., 2005). Ainsi, selon leurs teneurs moyennes en carbone organique total respectivement évaluées, les trois profils étudiés possèdent un contenu pauvre en carbone organique.

La figure 3.2 montre l'évolution des teneurs en carbone organique total selon la profondeur du sol, pour les 3 profils étudiés (*Voir* Figure 3.2, p.45). L'analyse de cette figure révèle des variations irrégulières de Carbone Organique Total (COT) dans les 3 profils de sol urbain.

Ainsi, les teneurs en carbone organique les plus élevées se rencontrent essentiellement dans les horizons de scories et les horizons de surface tandis que les teneurs en carbone organique les plus faibles se concentrent essentiellement dans les horizons de profondeur formés de fragments de roche, et ce à travers les 3 profils (*Voir* Figure 3.3, p.45). Les scories sont des déchets organiques qui proviennent de cendres domestiques ou d'usines d'incinération.

Par ailleurs, Lorenz et Kandeler (2005), Norra et al. (2008) puis Puskàs et Farsang (2008) ont aussi montré que des variations irrégulières de carbone organique ont été observées à propos de la distribution spatiale de la matière organique dans les sols urbains, contrairement aux sols naturels où les concentrations de carbone organique total (COT) sont plus élevées dans les horizons de surface (probablement dûe à la biomasse microbienne), puis diminuent

graduellement en profondeur. Ainsi, la dynamique de la matière organique dans les profils étudiés constitue une des différences majeures entre les sols urbains et les sols naturels.

Le tableau 3.4 présente les contenus massiques en débris grossiers en relation avec les teneurs en carbone organique respectivement enregistrées dans les horizons anthropiques des trois profils (*Voir* Tableau 3.4, p. 46). Ainsi, à l'exception des horizons de scories dont la matière organique est essentiellement d'origine industrielle, les profils 1, 2 et 3 possèdent des coefficients de corrélation de Pearson respectifs de -0.41, -0.55 et -0.96.

L'augmentation du contenu en débris grossiers corrèle parfaitement avec la diminution de la teneur en carbone organique dans le profil 3. La faiblesse des corrélations observée dans les profils 1 et 2 est probablement due à la variabilité des matériaux anthropiques qui constituent le site d'étude.

Ainsi, malgré les corrélations observées dans le profil 3, l'ensemble des corrélations obtenues ne permet pas d'affirmer avec exactitude que la faiblesse de la matière organique dans les horizons anthropiques, particulièrement les horizons de surface et les horizons de profondeur formés de fragments de roche, résulterait uniquement d'un contenu massique élevé en débris grossiers.

3.1.2.2.6 pH du sol et contenu en carbonates (CaCO_3)

Le profil 1 possède un pH moyen de 7.8 avec un minimum de 7.2 et un maximum de 8.2 (*Voir* Tableau 3.1, p. 42). Le profil 2 a un pH moyen de 8 avec un minimum de 7.7 et un maximum de 8.2 (*Voir* Tableau 3.2, p. 43). Quant au profil 3, il se caractérise par un pH minimum de 7.6 et un maximum de 8.1 soit une moyenne de 7.8 (*Voir* Tableau 3.3, p. 44). Ainsi, les profils étudiés se caractérisent essentiellement par des pH alcalins. Par conséquent, les sols en milieu urbain possèdent des pH plus élevés par rapport aux sols agricoles et forestiers dont les valeurs de pH sont comprises entre 4 et 7.

Cette alcalinité s'explique par la présence de divers matériaux anthropiques (débris de construction, fragments de roche et scories) qui libèrent des substances alcalines telles que les espèces carbonatées (HCO_3^- , CO_3^{2-}) dans la solution du sol (Craul, 1985; Jim, 1998; Norra et al., 2008; Puskas et Farsang, 2008). Ainsi en milieu urbain, le contenu en matériaux anthropiques influence la solution du sol.

De plus, cette étude révèle aussi un point important : pour les 3 profils étudiés, les pH les plus élevés se rencontrent dans les horizons de profondeur, formés de fragments de roche, tandis que les pH les plus faibles se rencontrent dans les horizons de scories.

La mesure de pH alcalins dans les horizons anthropiques étudiés est potentiellement liée à la présence de carbonates totaux évalués en équivalents de CaCO_3 . Ainsi, le profil 1 possède des concentrations minimum et maximum de 4.3% et 19%, soit un contenu moyen en carbonates de 9.8% (*Voir* Tableau 3.1, p. 42). Le profil 2 possède des teneurs minimum et maximum de 3.8% et de 21.2%, soit une moyenne de 10.1% (*Voir* Tableau 3.2, p. 43). Quant au profil 3, il se caractérise par des concentrations minimum et maximum de 1% et 12.2%, soit une moyenne de 8.3% (*Voir* Tableau 3.3, p. 44).

Par ailleurs, le contenu en carbonates totaux, évalué en équivalents de CaCO_3 constitue un indicateur environnemental très important car ce paramètre évalue le pouvoir tampon du sol. En effet, le pouvoir tampon d'un sol représente la capacité de résistance de ce sol à une variation du pH. Ainsi, un sol ayant un contenu en CaCO_3 très élevé, possède un fort pouvoir tampon, ce qui peut ralentir le processus de dissolution des métaux lourds, et ce en dépit d'une acidification. A l'inverse, un sol à faible teneur en CaCO_3 possède un faible pouvoir tampon, ce qui favorisera une dissolution des métaux lourds lors d'une diminution de pH (Galvez-Cloutier et Dubé, 1998).

Or, au sein des 3 profils étudiés, les concentrations les plus élevées en CaCO_3 se retrouvent essentiellement dans les horizons de surface et les horizons de profondeur formés de fragments de roche, tandis que les concentrations les plus faibles de CaCO_3 sont présentes dans les horizons de scories (*Voir* Tableau 3.1, p. 42; Tableau 3.2, p. 43 et Tableau 3.3, p. 44). Par conséquent, les horizons de scories possèdent un risque de dissolution plus élevé des métaux lourds dans le sol, à cause d'un faible contenu en carbonates, combiné à un faible pH.

Enfin, une corrélation a été déterminée entre le pH des sols urbains et le contenu en CaCO_3 pour les 3 profils étudiés (*Voir* Tableau 3.5, p.46). Cependant cette relation est difficilement évidente, contrairement à ce qu'affirment Puskàs et Farsang (2008). En effet, les profils 1 et 2 possèdent des corrélations respectives de 0.45 et 0.38 tandis qu'au niveau du profil 3, le pH est fortement corrélé au contenu en CaCO_3 . La variation des corrélations observées dans les trois profils est une indication de l'hétérogénéité qui caractérise les sites anthropiques urbains.

La faiblesse des corrélations observées dans les deux premiers profils pourrait s'expliquer par la présence d'un contenu relativement élevé en carbonates dans les horizons de scories des profils 1 et 2 par rapport à l'horizon de scories du profil 3 où le contenu minimum en carbonates n'est que de 1%. Ainsi, la variabilité du contenu en carbonates dans les horizons de scories pourrait justifier la faiblesse des corrélations observées dans les profils étudiés.

3.1.2.2.7 Teneurs en métaux de la fraction fine

Le Mn est distribué à travers les trois profils étudiés (*Voir* Figure 3.4, p. 47; Figure 3.5, p. 47 et Figure 3.6, p. 48). En effet, que ce soit dans les horizons de surface ou les horizons de profondeur formés de fragments de roche, les teneurs en Mn sont les plus élevées, et ce dans les trois profils analysés. Néanmoins, les teneurs les plus faibles de cet élément trace se rencontrent principalement dans les horizons de scories (*Voir* Figure 3.4, p. 47; Figure 3.5, p. 47 et Figure 3.6, p. 48).

Par ailleurs, les 3 horizons de surface des 3 profils sont aussi concentrés en Pb, Zn et Cu particulièrement pour l'horizon de surface (0-35 cm) du profil 3 où les teneurs en ces métaux sont respectivement de 444, 439 et de 224 ppm (*Voir* Figure 3.6, p. 48). Les concentrations élevées de ces trois éléments traces au sein de cet horizon pourraient s'expliquer par un contenu en silt plus élevé par rapport aux deux autres horizons de surface, ce qui accroît la rétention en métaux.

En dehors du Mn, les horizons de profondeur formés de fragments de roche sont aussi concentrés en Pb et Zn, et ce pour les trois profils étudiés. Le Cu y est présent mais à faible teneur (*Voir* Figure 3.4, p. 47; Figure 3.5, p.47 et Figure 3.6, p. 48).

Enfin, les horizons de scories répartis à travers les 3 profils se caractérisent par des concentrations élevées de Pb, Zn et de Cu (*Voir* Figure 3.4, p. 47; Figure 3.5, p. 47 et Figure 3.6, p. 48). Norra et al. (2008) ont aussi montré la présence de fortes concentrations de ces métaux au sein d'horizons de scories présents dans les sols urbains de Qingdao.

En résumé, l'analyse des teneurs en métaux dans la fraction fine des différents horizons anthropiques étudiés montre que la distribution des métaux dans les sols urbains est hétérogène. Cette hétérogénéité est liée à la typologie des matériaux anthropiques qui constituent les profils étudiés. En effet, les activités passées de remblaiement ont permis d'enfouir les différents matériaux tels que les débris de construction, les scories ou les fragments de roche. Aussi, la contamination de ces sols urbains résulte de l'enfouissement de ces matériaux hétérogènes selon des teneurs en éléments traces plus élevées que celles rencontrées dans le milieu naturel initial.

3.1.2.3 Étude minéralogique des horizons anthropiques

Les résultats des analyses minéralogiques sont présentés à l'Annexe 1.

Les analyses minéralogiques réalisées par diffraction aux rayons X (DRX) sur 9 échantillons provenant d'horizons anthropiques sélectionnés ont permis d'identifier les différents minéraux composant ces matrices. Ainsi, les horizons de surface, les horizons de scories et les horizons de profondeur formés de fragments de roche des 3 profils étudiés possèdent des phases silicatées majoritairement communes. Ces phases sont principalement composées de tectosilicates (quartz, albite, anorthite et orthoclase) et de phyllosilicates (muscovite et chlorite) (*Voir* Tableau 3.1, p. 42; Tableau 3.2, p. 43; Tableau 3.3, p. 44 et Annexe I, Figures AI-1; AI-2; AI-3; AI-4; AI-5; AI-6; AI-7; AI-8 et AI-9). Les silicates sont les minéraux constitutifs des roches naturelles.

Cependant, quelques différences minéralogiques ont été observées. En effet, les phases de chlorite sont plus faibles dans les horizons de surface et les horizons de profondeur, formés de fragments de roche, avec des teneurs allant de 2.2% à 5.4% (*Voir* Annexe I, Figures AI-1; AI-3; AI-4; AI-5; AI-6 et AI-7), tandis qu'elles sont plus élevées dans les horizons de scories analysés avec des teneurs allant de 4.3% à 17.85%, soit une moyenne de 11.5 % (*Voir* Annexe I, Figures AI-2; AI-8 et AI-9).

Par ailleurs, Véga et al. (2006) ont aussi montré que la chlorite constituait le minéral présent à de fortes teneurs dans le sol traité avec des résidus de scories, d'après les analyses minéralogiques réalisées sur 6 sols ayant reçu différents amendements. De plus, les chercheurs ont obtenu des corrélations très élevées entre le contenu en chlorite mesuré et le coefficient de sorption (K_d) des différents métaux analysés dans cette étude, particulièrement le Pb, le Cu, le Cd et le Zn.

Ainsi, la chlorite pourrait constituer un indicateur minéralogique des matériaux scoriacés. Aussi, un contenu élevé en chlorite pourrait accroître les propriétés d'adsorption des scories, ce qui augmenterait le potentiel de sorption des métaux dans les scories comme l'affirment également Véga et al. (2006).

De plus, les échantillons de scories analysés contiennent aussi des phases sulfures observés en faible quantité sous forme de pyrite (FeS_2), (*Voir* Annexe I, Figures AI-2; AI-8 et AI-9). Ces sulfures constituent des sources de métaux, particulièrement pour le Pb et le Cu (Wilhelmy et Richard, 2002; Duchesne et Mercier, 2003; Delville, 2004).

Les échantillons de scories observés possèdent une coloration assez noire qui provient de l'absence d'oxydation du fer au sein de ces particules (Wilhelmy et Richard, 2002). Les analyses minéralogiques réalisées sur les échantillons de scories sélectionnés confirment cette hypothèse. En effet, aucune phase d'oxyde de fer n'y a été observée (*Voir* Annexe I, Figures AI-2; AI-8 et AI-9). Or, plusieurs études réalisées sur les scories provenant de cendres d'incinérateurs industrielles mentionnent la présence de phases d'oxydes de Fe (Kirby et Rimstidt, 1993; Freyssinet et al., 1998; Eusden et al., 1999; Eypert-Blaison, 2000). Ainsi, l'absence d'oxydes de fer au sein des particules de scories analysées par DRX pourrait confirmer l'origine domestique des scories.

Les horizons de scories se caractérisent aussi par une absence totale des phases carbonatées, à l'exception de l'horizon de scories (55-80 cm) du profil 1, qui possède une forme assez particulière de carbonate : l'aragonite (*Voir* Tableau 3.1, p. 42; Tableau 3.2, p. 43; Tableau 3.3, p. 44 et Annexe I, Figures AI-2; AI-8 et AI-9).

Par ailleurs, les phases carbonatées sont généralement présentes dans les horizons de surface sous forme de calcite, combinées à d'autres formes de carbonates telles que l'ankérite et la dolomie (*Voir* Tableau 3.1, p. 42; Tableau 3.2, p. 43; Tableau 3.3, p. 44). En effet, les teneurs de calcite dans les trois horizons de surface des 3 profils sont respectivement de 3.07%, 5.28% et 8.14% (*Voir* Annexe I, Figures AI-1; AI-6 et AI-7). De même, les horizons de

profondeur composés de fragments de roche, prélevés du profil 1 contiennent aussi des phases de calcite et de dolomie à faible teneur, à l'exception de l'horizon (80-200 cm) (*Voir* Tableau 3.1, p. 42 et Annexe I, Figures AI-3; AI-4 et AI-5).

La présence de calcite dans les horizons de surface étudiés confirme la mesure de pH alcalins obtenus compris entre 8 et 8.14. De même, la présence de calcite confirme la mesure de carbonates compris entre 12.2% et 21.2% au sein de ces 3 horizons. Toutefois, la relation pH-calcite est ambiguë dans cette étude car, l'horizon de surface (0-35 cm) du profil 3 possède le pH le plus faible mais possède le contenu en calcite le plus élevé contrairement aux deux horizons de surface des profils 1 et 2 dont l'augmentation du pH correspond à une augmentation du contenu en calcite. De même, la relation calcite-carbonate manque aussi de clarté dans la mesure où l'horizon de surface (0-35 cm) du profil 3 possède le contenu en calcite le plus élevé (8.14%) mais possède le contenu en carbonates le plus faible (12.2%) contrairement aux deux horizons de surface des profils 1 et 2 dont l'augmentation de calcite correspond à une augmentation du contenu en carbonates.

Malgré tout, la présence de calcite dans les horizons anthropiques urbains semble constituer un indicateur de la présence des matériaux de nature calcaire (débris de construction, fragments de roche) tout comme l'affirment également Norra et al. (2006).

Par ailleurs, les analyses de DRX n'ont pas permis d'identifier les phases métallifères spécifiques des différents horizons anthropiques étudiés à l'exception de la chalcopryrite, un sulfure de Cu présent en très faible quantité (0.16%) dans l'horizon (230-260 cm) du profil 1 (*Voir* Annexe I, Figure AI-5). Cela s'expliquerait par la faiblesse du contenu en métaux analysé c'est-à-dire inférieur au seuil de détection de 1% soit 10^4 ppm, ce qui rend difficilement détectable l'observation de phases porteuses de métaux par la technique de diffraction aux rayons X.

En résumé, la 1^{ère} phase de cette étude a montré que l'application d'une démarche pédologique adaptée à l'étude des profils de sols urbains formés par remblaiement a permis d'identifier les différents horizons anthropiques, puis de déterminer les propriétés pédo-morphologiques physico-chimiques et minéralogiques nécessaires à la compréhension du fonctionnement de ces sols.

Ainsi, 16 différents horizons anthropiques répartis en 3 profils distincts ont été identifiés. Ces horizons sont principalement composés de trois types de matériaux qui sont les débris de construction, les scories et les fragments de roche. Les horizons rencontrés en surface sont composés de débris de construction et de fragments de roche tandis que les horizons de profondeur sont formés de scories et de fragments de roche. De ce fait, l'identification des horizons anthropiques en milieu urbain est d'abord fonction de la nature des matériaux hétérogènes qui constituent les profils de sols urbains formés par remblaiement.

Par ailleurs, les paramètres pédo-morphologiques évalués par observation visuelle constituent aussi des outils supplémentaires de différenciation des horizons anthropiques rencontrés en milieu urbain. Jim (1998) l'affirme également. Ainsi, la couleur du sol constitue un critère d'identification des différents horizons anthropiques dans la mesure où ce paramètre confirme la typologie des matériaux rencontrés en milieu urbain (débris de construction, scories et fragments de roche).

La structure du sol constitue aussi un outil de différenciation marquée des horizons anthropiques identifiés. En effet, ce paramètre a permis de déterminer le mode d'organisation des particules qui composent les différents horizons rencontrés. Cependant, à l'exception des horizons formés de fragments de roche où la structure est clairement identifiée (massive ou énorme), les horizons de surface et les horizons de scories possèdent des structures qui varient relativement selon les profils étudiés (*Voir* Tableau 3.1, p. 42; Tableau 3.2, p. 43 et Tableau 3.3, p. 44).

À cet effet, d'autres études pédologiques des profils de sols urbains sont nécessaires afin de mieux évaluer la nature des différentes structures relatives aux différents matériaux anthropiques rencontrés, tels que les horizons de surface formés de débris de construction et de fragments de roche et les horizons de scories, dans l'optique d'évaluer le fonctionnement de ces matériaux hétérogènes (ex. écoulement de l'eau, transport des contaminants).

De même, les paramètres physico-chimiques et minéralogiques évalués au laboratoire constituent des outils nécessaires à la compréhension des propriétés des différents horizons anthropiques identifiés qui composent les profils de sols urbains étudiés. En effet, la texture constitue un paramètre important. Toutefois, compte tenu de la prépondérance de la fraction grossière au sein des différents horizons anthropiques identifiés, une distribution granulométrique complète est nécessaire, quelque soit la nature des matériaux anthropiques rencontrés, afin d'obtenir une répartition de la taille des particules qui intègre l'étude de la fraction grossière.

Par ailleurs, le contenu en carbone organique total constitue un paramètre chimique de différenciation marquée des horizons anthropiques rencontrés dans cette étude. En effet, les teneurs en carbone organique les plus élevées se rencontrent essentiellement dans les horizons de scories et les horizons de surface tandis que les teneurs en carbone organique les plus faibles se concentrent essentiellement dans les horizons de profondeur formés de fragments de roche. Ainsi, la distribution de la matière organique dans les profils de sols urbains formés par remblaiement est fonction de la nature des différents matériaux anthropiques qui composent les horizons étudiés, contrairement aux profils de sols naturels, où les teneurs en matière organique sont plus élevées dans les horizons de surface, puis diminuent graduellement dans les horizons en profondeur.

De plus, le pH du sol combiné au contenu en carbonates (CaCO_3) peuvent constituer des paramètres physico-chimiques de différenciation marquée des horizons anthropiques dans la mesure où ils ont permis d'évaluer le risque de dissolution des métaux au sein des différents matériaux anthropiques constituant les horizons étudiées (ex. les horizons de scories).

Les analyses minéralogiques réalisées par DRX pourraient aussi constituer un outil de différenciation des matériaux anthropiques qui constituent les profils de sol urbains étudiés. En effet, la chlorite pourrait constituer un indicateur minéralogique des matériaux scoriacés tandis que la calcite semble constituer un indicateur minéralogique de la présence des matériaux anthropiques de nature calcaire (ex. débris de construction, fragments de roche). Quant aux phases sulfures observées, elles pourraient constituer des potentielles sources de métaux dans les sols urbains (ex. cas de la chalcopryrite, un sulfure de Cu observée dans l'horizon (230-260 cm) du profil 1). Toutefois, d'autres études pédologiques des profils de sols urbains, couplées d'analyses minéralogiques supplémentaires sont nécessaires, particulièrement dans les sols urbains fortement contaminés afin d'identifier des potentielles phases métallifères.

Par ailleurs, la phase historique aussi ne doit pas être négligée dans l'étude des profils de sols urbains formés par remblaiement. En effet, l'historique du site d'étude constitue une étape cruciale dans la mesure où elle permet d'avoir un aperçu des activités industrielles passées qui se sont déroulées sur le site.

Ainsi, selon le *World Reference Base for Soil Resources* (WRB), les trois profils étudiés sont des *technosols* car ce terme désigne les sols contenant au moins 30% d'artéfacts (volume). Par définition, les artéfacts sont des substances solides ou liquides rencontrées dans le sol, qui ont été créées ou modifiées substantiellement par les humains durant des activités industrielles passées. Dans le cadre de cette étude, les matériaux rencontrés (fragments de roche, scories et débris de construction) constituent des artéfacts dans la mesure où ils ont été apportés dans le cadre d'une activité anthropique passée : le remblaiement.

De plus, les préfixes *garbique* et *urbique* peuvent y être ajoutés car les artéfacts rencontrés sur ce site d'étude sont des débris de construction et des déchets organiques (scories). De même, les suffixes *skeletal*, *arénic* et *calcaric* peuvent y être respectivement ajoutés afin de mieux les caractériser. En effet, les profils étudiés possèdent des horizons anthropiques qui se

caractérisent par des contenus élevés en fragments grossiers, une texture majoritairement sableuse et des horizons qui possèdent des contenus moyens en carbonates supérieurs à 2 %. Par conséquent, les 3 profils étudiés sont des *technosols garbiques urbiques* (*skeletal, arénic, calcaric*).

Ainsi, le *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) constitue un bon outil de classification des sols anthropiques urbains contrairement au système canadien de classification qui en est totalement dépourvu. En effet, les sols anthropiques urbains sont considérés comme des non-sols selon le Guide Canadien du Système de classification des sols, d'où le besoin d'établir au Canada un ordre ou un système adapté aux sols anthropiques urbains afin de répondre aux besoins de connaissance de la ressource "sol" face à une augmentation croissante de la population en milieu urbain.

3.2 Phase 2 – Teneurs en métaux lourds des fractions grossières des horizons anthropiques étudiés

3.2.1 Présentation sommaire des résultats

Les figures 3.7, 3.8 et 3.9 représentent la distribution granulométrique de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport à la fraction fine des trois profils étudiés.

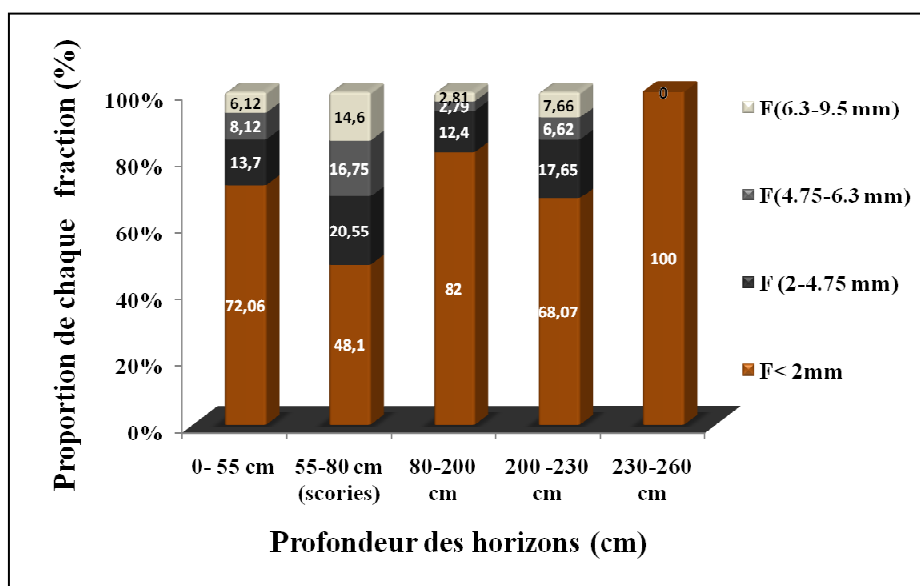


Figure 3.7 Distribution granulométrique de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport à la fraction fine (Profil 1)

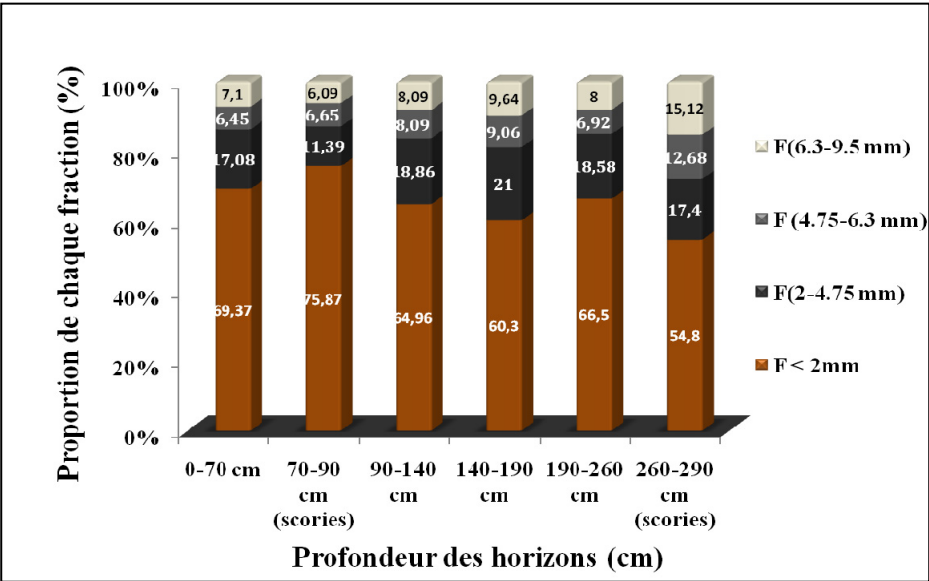


Figure 3.8 Distribution granulométrique de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport à la fraction fine (Profil 2)

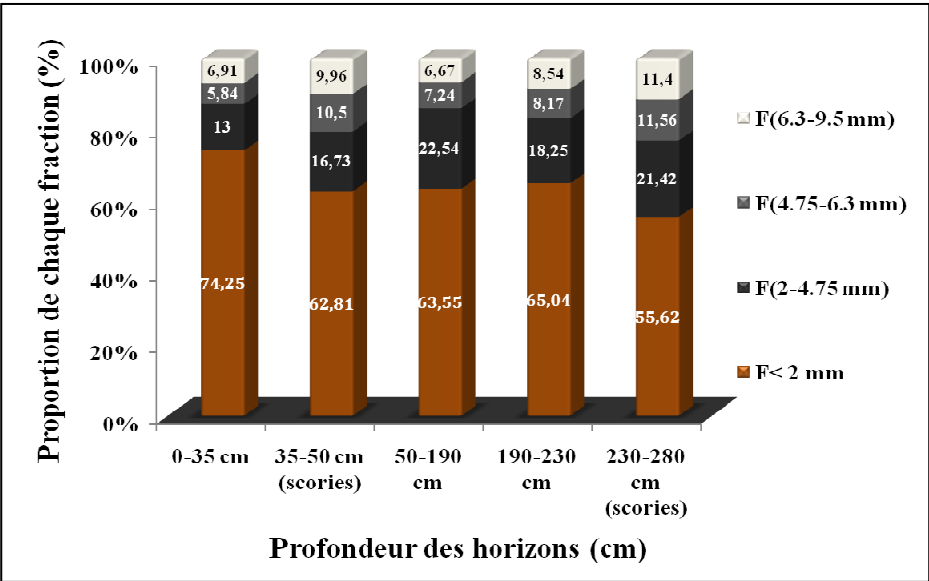


Figure 3.9 Distribution granulométrique de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport à la fraction fine (Profil 3)

Tableau 3.6 Teneurs pondérales en métaux des différentes fractions granulométriques de l'échantillon de scories de l'horizon (55-80 cm) du Profil 1 (mg/ kg fraction granulométrique)

X	Pb	Zn	Mn	Cu
Concentration pondérale F (2-4.75mm)	52.22	20.67	38.45	62.29
Concentration pondérale F (4.75-6.3 mm)	15.76	6.47	12.96	20.63
Concentration pondérale F (6.3-9.5 mm)	15	4.21	10.67	21.28
Concentration pondérale F grossière (2-9.5 mm)	82.98	31.35	62.08	104.2
Concentration pondérale F fine (< 2mm)	104.02	94.71	120.59	100.43
Masse totale du métal contenue dans l'échantillon (mg/kg sol sec)	187	126.06	182.67	204.63

Les figures 3.10, 3.11 et 3.12 représentent les apports massiques en métaux (fraction fine vs fraction grossière) des trois profils étudiés.

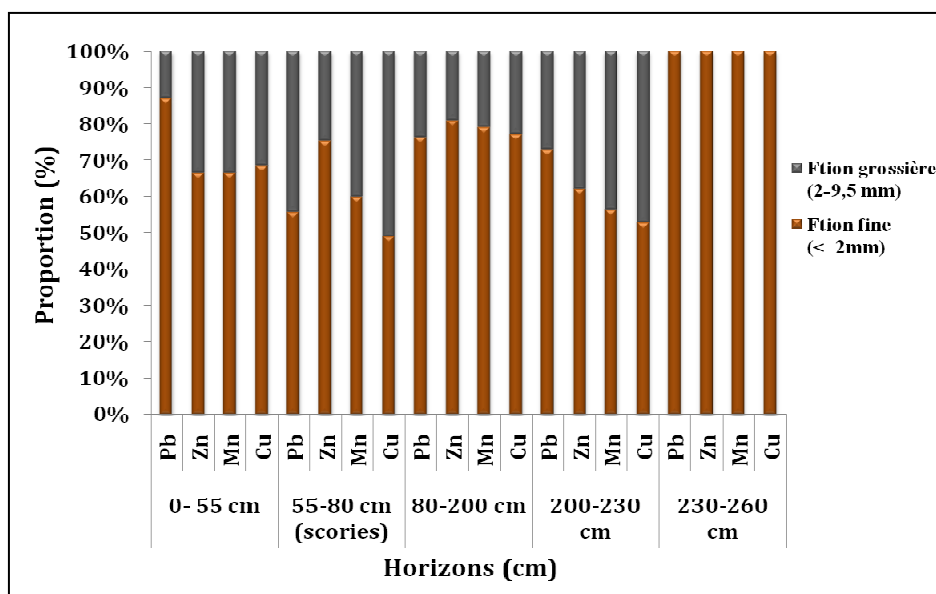


Figure 3.10 Apports massiques en métaux du profil 1

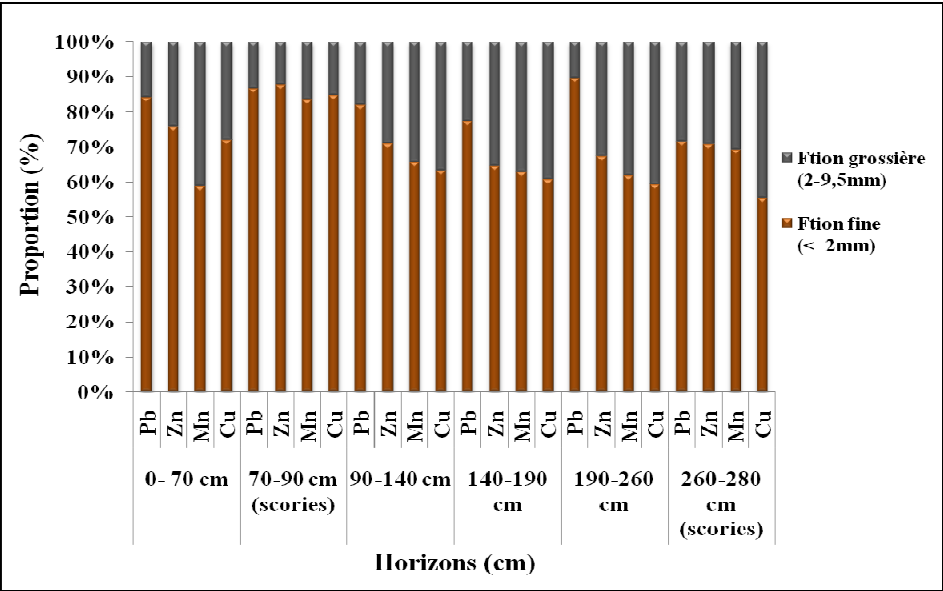


Figure 3.11 Apports massiques en métaux du profil 2

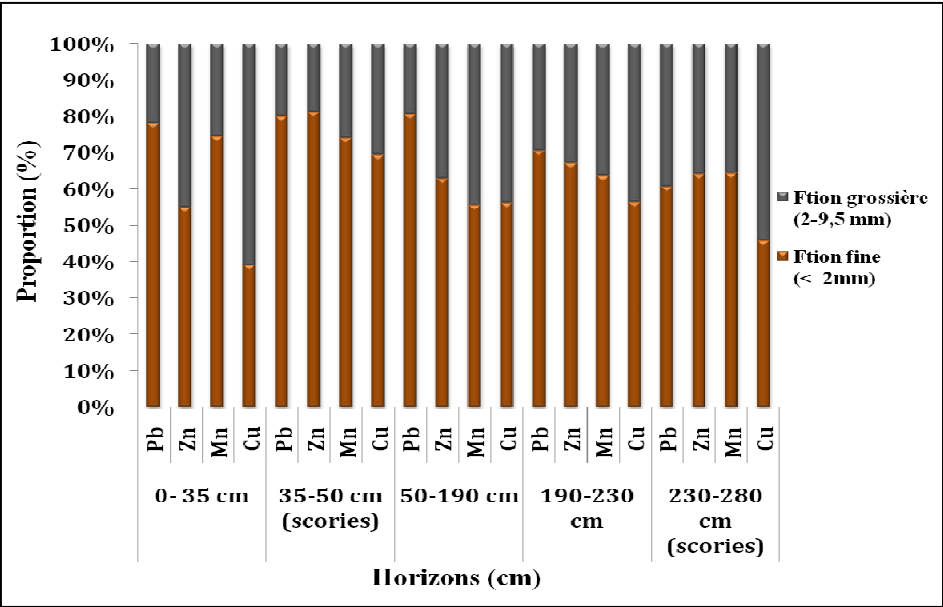


Figure 3.12 Apports massiques en métaux du profil 3

3.2.2 Analyse et discussion des résultats

3.2.2.1 Distribution granulométrique de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport à la fraction fine tamisée à 2 mm

Les figures 3.7, 3.8 et 3.9 représentent les distributions granulométriques respectives des fractions grossières (2-9.5 mm) des différents horizons anthropiques des 3 profils étudiés par rapport aux fractions fines correspondantes (*Voir* Figure 3.7, p. 67; Figure 3.8, p. 68 et Figure 3.9, p. 68).

Selon les résultats observés dans les 3 profils, les fractions fines de sol c'est-à-dire inférieures à 2 mm constituent les proportions massiques les plus élevées, particulièrement dans les horizons de surface et les horizons de profondeur formés de fragments de roche. En effet, les fractions fines des 3 profils étudiés représentent des proportions moyennes respectives de 74%, 65% et 64% du contenu total des échantillons, prélevés et tamisés à 9.5 mm (*Voir* Figure 3.7, p. 67; Figure 3.8, p. 68 et Figure 3.9, p. 68). Inversement, le contenu massique de la fraction grossière compris entre 2 et 9.5 mm, toutes tailles confondues, varie dans les 3 profils selon une moyenne allant de 26% à près de 36%.

Les fractions fines des échantillons de scories constituent de façon générale les proportions massiques les plus faibles, particulièrement au niveau des horizons de scories (55-80 cm) du profil 1, (260-290 cm) du profil 2, et (230-280 cm) du profil 3. En effet, les fractions grossières (2-9.5 mm) de ces trois horizons de scories, possèdent des proportions respectives de 52%, 45% et 44.4% du contenu massique total des échantillons de scories prélevés et tamisés à 9.5 mm (*Voir* Figure 3.7, p. 67; Figure 3.8, p. 68 et Figure 3.9, p. 68).

Enfin, concernant la distribution granulométrique des particules grossières comprises entre 2 et 9.5 mm, la fraction granulométrique grossière (2-4.75 mm) constitue la proportion massique la plus élevée, suivie alternativement des deux autres fractions granulométriques grossières étudiées (4.75-6.3 mm) et (6.3- 9.5 mm), et ce dans les 3 profils (*Voir* Figure 3.7, p. 67; Figure 3.8, p. 68 et Figure 3.9, p. 68).

En synthèse, la fraction fine désignant l'ensemble des particules de sol inférieures à 2 mm constitue certes, la proportion massique la plus élevée lors du traitement des échantillons de sols urbains. Cependant d'après les observations effectuées, la fraction grossière (2-9.5 mm) souvent négligée lors des analyses physico-chimiques peut être présente en proportions massiques non-négligeables, particulièrement dans les horizons de scories où la fraction grossière peut parfois atteindre plus de 50% de l'échantillon de sol prélevé et tamisé à 9.5 mm.

3.2.2.2 Répartition des métaux lourds (Pb, Zn, Mn et Cu) entre les fractions fines et grossières

Les figures analysées sont présentées en Annexe 2, compte tenu de leur nombre important.

Les résultats présentés en Annexe 2 montrent que la distribution des métaux étudiés (Pb, Zn, Mn et Cu) entre les fractions fines et grossières est fonction de la nature des métaux analysés.

En effet, la fraction fine demeure généralement plus concentrée en Pb par rapport aux différentes fractions grossières correspondantes étudiées, que ce soit dans les horizons de surface ou dans les horizons de profondeur formés de fragments de roche. De même, les concentrations de Pb augmentent selon la diminution de la taille des particules dans les horizons de scories. À cet effet, une étude réalisée par Stegemann et Schneider (1991) sur la granulochimie des scories, matériaux utilisés en ex-RFA comme remblais de construction routière renforce cette hypothèse. Leurs travaux démontrent que les particules les plus fines de scories sont plus concentrées en Pb que les autres fractions grossières étudiées comprises entre 2 et supérieures à 8 mm. Ainsi, dans le cas présent, les fractions fines sont plus concentrées en Pb que les fractions grossières, que ce soient dans les horizons de surface, les horizons de profondeur formés de fragments de roche ou les horizons de scories.

Par ailleurs, la distribution du Zn entre les fractions fines et grossières est fonction de la typologie des matériaux anthropiques constitutifs des horizons étudiés. En effet, le Zn est fortement concentré dans les fractions grossières par rapport aux fractions fines des horizons de surface et des horizons de profondeur formés des matériaux de construction et des fragments de roche, à l'exception des horizons (0-70 cm), (90-140 cm), (140-190 cm) du profil 2 et (190-230 cm) du profil 3.

Cependant, les teneurs de ce métal augmentent selon la diminution de la taille des particules dans les horizons de scories des 3 profils étudiés. Plusieurs auteurs confirment cette idée (Stegemann et Schneider, 1991 ; Freyssinet et al., 1998). En effet dans leurs travaux sur les scories utilisées comme remblais routiers, les chercheurs affirment que les concentrations de Zn augmentent selon la diminution de la taille des particules de scories (Stegemann et Schneider, 1991). De même, Freyssinet et al. (1998), démontrent dans leur étude sur les Mâchefers d'Incineration des Ordures Ménagères (MIOM) que la teneur en Zn est plus concentrée dans les particules plus fines puis diminue au fur et à mesure que la taille des particules augmente. Ainsi, les particules les plus fines de scories sont plus concentrées en Zn que les particules grossières.

Le Mn est distribué dans toutes les fractions analysées à travers tous les profils étudiés. De même, tout comme le Zn, cet élément trace possède aussi une distribution qui est fonction de la typologie des matériaux constitutifs des horizons étudiés. Ainsi, que ce soit dans les horizons de surface composés de débris de construction ou les horizons de profondeur formés de fragments de roche, le Mn est plus concentré dans les fractions grossières étudiées que les fractions fines analysées.

Cependant, la dynamique de ce métal est différente dans les horizons de scories. En effet, tout comme le Pb et le Zn, les teneurs de Mn augmentent selon la diminution de la taille des particules de scories et ce, pour les 3 profils étudiés. Ainsi, les particules les plus fines de scories sont plus concentrées en Mn que les particules grossières.

Le Cu est plus concentré dans les différentes fractions grossières comprises entre 2 et 9.5 mm par rapport aux fractions fines analysées des horizons de surface et des horizons de profondeur. À cet effet, El Khalil et al. (2007) affirment que la fraction grossière formée essentiellement de fragments de roche est responsable de la libération de la totalité du Cu extrait dans certains échantillons de sol urbain de Marrakech.

Par ailleurs, les teneurs en Cu sont plus élevées dans les particules grossières de scories comprises entre 2 et 4.75 mm par rapport aux autres fractions étudiées, incluant la fraction fine. À cet effet, Freyssinet et al. (1998) à travers leur étude sur les Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (MIOM) démontrent aussi que le Cu est le seul élément trace significativement plus enrichi dans la fraction comprise entre 1.25 et 5 mm par rapport aux différentes fractions étudiées, incluant les particules les plus fines. Ainsi, la fraction grossière (2-4.75 mm) des horizons de scories est plus concentrée en Cu que les autres fractions étudiées, incluant la fraction fine.

3.2.2.3 Apports massiques en métaux de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport aux masses totales en éléments traces contenues dans les échantillons de sol

3.2.2.3.1 Calcul de l'apport massique en métaux de la fraction grossière (2-9.5 mm) par rapport aux masses totales de métaux contenues dans un échantillon prélevé et tamisé à 9.5 mm

Les masses totales de Pb, Zn, Mn et Cu des différentes fractions granulométriques qui constituent l'échantillon de scories provenant de l'horizon (55-80 cm) du profil 1 ont été calculées. Elles sont présentées dans le tableau 3.6 (*Voir* Tableau 3.6, p. 69).

Ainsi, les apports massiques des 4 métaux provenant de la fraction grossière (2-9.5 mm), toutes tailles confondues, représentent respectivement 44.37%, 24.87%, 34% et 50.92% des masses totales de métaux, pour une fraction grossière (2-9.5 mm) estimée à 52%.

Les masses totales des métaux (Pb, Zn, Mn et Cu) des échantillons provenant des 16 horizons anthropiques étudiés ont été calculées selon cette méthode. Elles sont présentées dans l'annexe 3. Par la suite, les apports massiques en métaux provenant de la fraction grossière (2-9.5 mm) toutes tailles confondues ont été calculés par rapport aux teneurs totales en métaux contenues dans les échantillons. Ils sont aussi présentés dans l'annexe 3, puis résumés dans les figures 3.10, 3.11 et 3.12.

3.2.2.3.2 Étude des apports massiques en métaux des fractions grossières (2-9.5 mm) des différents horizons anthropiques étudiés

L'analyse des figures 3.10, 3.11 et 3.12 montre que les apports massiques des différents métaux (Pb, Zn, Mn et Cu) provenant des 16 différentes fractions fines analysées sont fortement élevés par rapport aux masses totales des métaux contenues dans les échantillons. Toutefois, les apports massiques de ces éléments traces provenant des fractions grossières (2-9.5 mm) correspondantes sont aussi significatifs et ce, quelque soit la nature des matériaux anthropiques étudiés et le pourcentage massique de la fraction grossière comprise entre 2 et 9.5 mm (*Voir* Figure 3.10, p. 69; Figure 3.11, p. 70 et Figure 3.12, p. 70).

Ainsi, les apports massiques en métaux provenant des différentes fractions grossières étudiées (2-9.5 mm) paraissent maximales pour le Cu et le Mn et minimales pour le Zn et le Pb.

En effet, que ce soit dans les horizons de surface, les horizons de scories ou les horizons de profondeur, les apports massiques en Mn et en Cu provenant des différentes fractions grossières étudiées (2-9.5 mm) sont très élevés par rapport aux masses totales de Mn et de Cu contenues dans ces échantillons et peuvent parfois atteindre pour le Cu, plus de 50% de la masse totale du métal contenue dans les échantillons prélevés. Cela a été observé notamment dans l'horizon de surface (0-35 cm) du profil 3 et les horizons de scories (55-80 cm) du profil 1 et (230-280 cm) du profil 3 (*Voir* Figure 3.10, p. 69 et Figure 3.12, p. 70).

À cet effet, une étude réalisée par El Khalil et al. (2008) sur la contribution en métaux de la fraction grossière des sols urbains de Marrakech, démontre que pour les 3 horizons de surface, formés de matériaux de construction, et possédant des contenus massiques respectifs en éléments grossiers de 31.5%, 39.9% et 59.2%, les contributions réelles de Cu provenant des 3 fractions grossières correspondantes représentaient des proportions maximales et respectives de 75%, 100% et 96% de la masse totale de métal libéré dans le sol.

Par ailleurs, les apports massiques en Zn des fractions grossières (2-9.5 mm) des différents horizons anthropiques étudiés, contribuent faiblement aux masses totales de Zn contenues dans les échantillons analysés à l'exception des horizons de surface (0-55 cm) et (0-35 cm) des profils 1 et 3 dans cette étude (*Voir* Figure 3.10, p. 69 et Figure 3.12, p. 70). En effet, les apports massiques de cet élément trace provenant des fractions grossières (2-9.5 mm) de ces deux horizons de surface représentent respectivement 35.7% et 45.1% des teneurs totales de Zn contenues dans ces échantillons.

À cet effet, selon El Khalil et al. (2008), les contributions réelles de Zn provenant des fractions grossières des 3 horizons de surface anthropiques, formés de matériaux de construction, représentaient des proportions maximales et respectives de 100%, 65% et 60% de la masse totale du métal libéré et ce, pour des contenus massiques de fraction grossière respectivement évalués à 31.5%, 40%, et 59% dans les sols urbains de Marrakech.

Enfin, les apports massiques de Pb des fractions grossières (2-9.5 mm) des différents horizons anthropiques étudiés sont généralement faibles par rapport aux masses totales contenues de cet élément trace, à l'exception des horizons de scories (55-80 cm) du profil 1 et (230-280 cm) du profil 3 (*Voir* Figure 3.10, p. 69 et Figure 3.12, p. 70). En effet, les apports massiques de cet élément trace provenant des fractions grossières (2-9.5 mm) de ces deux horizons de scories représentent respectivement 44.4% et 39.3% des teneurs totales de Pb contenues dans ces échantillons.

En résumé, la seconde phase de cette étude a démontré que la fraction grossière, souvent négligée, peut constituer une proportion massique importante lors du traitement des échantillons de sols urbains. De ce fait, la distribution granulométrique de la fraction grossière par rapport à la fraction fine constitue un outil important d'évaluation de la répartition des métaux au sein de la fraction grossière.

Par ailleurs, la répartition des métaux (Pb, Zn, Mn et Cu) entre les fractions fines et les fractions grossières correspondantes a montré que la distribution des métaux entre les différentes fractions étudiées est fonction de la nature des métaux analysés. Aussi, les concentrations de métaux entre les fractions fines et les fractions grossières correspondantes ne sont pas uniformes d'où l'importance de réaliser une distribution granulométrique grossière en relation avec la fraction fine afin d'avoir une meilleure représentativité des concentrations de métaux contenues dans les sols urbains.

De plus, les résultats démontrent aussi que la fraction grossière peut influencer les propriétés physico-chimiques des sols urbains, particulièrement au niveau des teneurs totales de métaux contenues dans les sols anthropiques urbains. En effet, les apports massiques en métaux provenant des fractions grossières étudiées (2-9.5 mm) des différents horizons anthropiques étudiés paraissent maximales pour le Cu et le Mn et peuvent parfois atteindre pour le Cu, plus de 50% de la masse totale du métal contenue dans les échantillons prélevés.

De même, les apports massiques en métaux provenant des différentes fractions grossières étudiées (2-9.5 mm) paraissent minimales pour le Zn et le Pb à l'exception des horizons de surface (0-55 cm) et (0-35 cm) des profils 1 et 3 où les apports massiques de Zn provenant des fractions grossières (2-9.5 mm) de ces deux horizons anthropiques représentent respectivement 35.7% et 45.1% des masses totales de Zn contenues dans ces échantillons.

Par conséquent, l'échantillonnage de la fraction fine des sols urbains doit tenir compte de la fraction grossière, quelque soit la nature des matériaux anthropiques étudiés et le contenu massique en débris grossiers afin d'avoir une meilleure représentativité des teneurs totales de métaux contenues dans ces sols.

Aussi, l'application d'une démarche pédologique à la caractérisation des sols urbains formés par remblaiement doit intégrer l'étude de la fraction grossière afin de compléter la caractérisation des sols anthropiques urbains sur la base des concentrations de contaminants.

CONCLUSION

4.1 Conclusion

En conclusion, 16 différents horizons anthropiques répartis en 3 profils distincts ont été identifiés par observation visuelle selon la nature des matériaux rencontrés dans cette étude. Ces horizons sont principalement composés de trois types de matériaux hétérogènes : débris de construction, scories et fragments de roche.

De plus, les 3 profils de sols urbains étudiés se caractérisent par des contenus élevés en débris grossiers au sein des horizons anthropiques qui les constituent et des différences peu marquées de structure. Cependant, le point commun des structures étudiées est qu'elles ne résultent pas d'une activité pédologique naturelle mais anthropique : le remblaiement.

Les horizons anthropiques étudiés possèdent une texture sableuse tandis que les horizons de scories possèdent une texture "scoriacée" selon le Système Canadien de Classification. De plus, les profils de sols urbains formés par remblaiement se caractérisent par un contenu pauvre en carbone organique.

Par ailleurs, la mesure de pH alcalins dans les horizons anthropiques étudiés est potentiellement liée à la présence de carbonates totaux évalués en équivalents de CaCO_3 . À cet effet, les concentrations les plus élevées en CaCO_3 se retrouvent essentiellement dans les horizons de surface et les horizons de profondeur formés de fragments de roche, tandis que les concentrations les plus faibles de CaCO_3 se rencontrent dans les horizons de scories au sein des 3 profils étudiés.

L'analyse des teneurs en métaux dans la fraction fine des différents horizons anthropiques étudiés a montré que la distribution des métaux dans les sols urbains est hétérogène. Cette hétérogénéité est liée à la typologie des matériaux anthropiques qui constituent les profils étudiés.

En somme, les paramètres pédo-morphologiques évalués par observation visuelle constituent des outils supplémentaires de différenciation des horizons anthropiques rencontrés en milieu urbain. Par exemple, la couleur du sol constitue un critère d'identification des différents horizons anthropiques dans la mesure où ce paramètre confirme la typologie des matériaux rencontrés en milieu urbain (débris de construction, scories et fragments de roche).

De même, les paramètres physico-chimiques et minéralogiques évalués au laboratoire constituent aussi des outils nécessaires à la compréhension des propriétés des différents horizons anthropiques identifiés qui composent les profils de sols urbains étudiés. Ainsi, le contenu en carbone organique total constitue un paramètre chimique de différenciation marquée des horizons anthropiques rencontrés dans la mesure où la distribution de la matière organique dans les profils de sols urbains formés par remblaiement est fonction de la nature des différents matériaux anthropiques qui composent les horizons étudiés.

De même, le pH du sol combiné au contenu en carbonates (CaCO_3) peuvent constituer des paramètres physico-chimiques de différenciation des horizons anthropiques dans la mesure où ils ont permis d'évaluer le risque de dissolution des métaux au sein des différents matériaux anthropiques constituant les horizons étudiés (ex. les horizons de scories).

Par ailleurs, l'utilisation de la minéralogie a permis de mettre en évidence les phases minéralogiques spécifiques aux différents matériaux anthropiques qui constituent les horizons étudiés. Ainsi, la chlorite pourrait constituer un indicateur minéralogique des matériaux scoriacés tandis que la calcite semble constituer un indicateur minéralogique de la présence des matériaux anthropiques de nature calcaire (ex. débris de construction, fragments de roche).

En somme, les 3 profils étudiés sont des *technosols garbiques urbiques* (*calcaric, arénic, skeletal* selon le *World Reference Base for Soil Ressources* (WRB). Ainsi, cette étude a montré que le *World Reference Base for Soil Ressources* (WRB) constituait un bon outil de classification des sols anthropiques urbains à travers l'utilisation de préfixes ou de suffixes

qui font référence à cet ordre, contrairement au système canadien de classification qui en est totalement dépourvu.

En résumé, l'application d'une démarche pédologique à l'étude des profils de sols urbains formés par remblaiement a d'abord permis d'identifier les différents horizons anthropiques, puis de déterminer les propriétés pédo-morphologiques, physico-chimiques et minéralogiques des horizons anthropiques nécessaires à la compréhension du fonctionnement de ces sols. Par conséquent, notre première hypothèse a été vérifiée.

Par ailleurs, la seconde phase de cette étude a démontré que la fraction grossière, souvent négligée, peut constituer une proportion massique importante lors du traitement des échantillons de sols urbains. De ce fait, la distribution granulométrique de la fraction grossière par rapport à la fraction fine constitue un outil important d'évaluation de la répartition des métaux au sein de la fraction grossière.

De plus, les résultats obtenus ont montré que la répartition des métaux étudiés (Pb, Zn, Mn et Cu) entre les fractions fines et les fractions grossières correspondantes est fonction de la nature des métaux analysés. Ainsi, les concentrations de métaux entre les fractions fines et les fractions grossières correspondantes ne sont pas uniformes, d'où l'importance de réaliser une distribution granulométrique grossière en relation avec la fraction fine afin d'avoir une meilleure représentativité des concentrations de métaux contenues dans les sols urbains.

Les résultats obtenus ont aussi démontré que la fraction grossière peut influencer les propriétés physico-chimiques des sols urbains, particulièrement au niveau des teneurs totales de métaux contenues dans les sols anthropiques urbains. Par conséquent, notre seconde hypothèse est vérifiée. En effet, bien que les apports massiques des métaux (Pb, Zn, Mn et Cu) provenant des différentes fractions fines analysées soient fortement élevés, les apports massiques en métaux des fractions grossières correspondantes (2-9.5 mm) sont aussi importants par rapport aux masses totales contenues de ces éléments traces.

Par conséquent, l'échantillonnage de la fraction fine des sols urbains doit tenir compte de la fraction grossière, quelle que soit la nature des matériaux anthropiques rencontrés et le contenu massique en débris grossiers afin d'avoir une meilleure représentativité des teneurs totales de métaux contenues dans ces sols.

En conclusion, l'approche pédologique adaptée à la caractérisation des sols urbains formés par remblaiement doit intégrer l'étude de la fraction grossière afin de compléter la caractérisation des sols anthropiques urbains sur la base des concentrations totales de contaminants.

4.2 Recommandations

Ce travail constitue une étude préliminaire des profils pédologiques des sols urbains formés par remblaiement. À cet effet, il importe de :

1. Réaliser des analyses granulométriques plus complètes et mieux adaptées à l'étude des sols urbains qui incluent le contenu de la fraction grossière mais aussi, qui intègrent l'analyse granulométrique des matériaux anthropiques spécifiques tels que les scories. Par conséquent, d'autres modèles spécifiques de granulométrie (ex. modèle ASTM, la diffractométrie au Laser, dispersion ultrasonique) devraient être testés au laboratoire;
2. Étudier d'autres sites anthropiques urbains afin de coupler les profils pédologiques identifiés à la caractérisation géophysique des sols urbains, à travers la réalisation de profils de résistivité électriques. L'objectif est de déterminer les propriétés géophysiques des matériaux anthropiques étudiés en relation avec les profils pédologiques identifiés;
3. Réaliser des essais de type Beerkan sur les profils de sol urbains afin de déterminer les paramètres de conductivité hydraulique en milieu saturé (K_s) et de la courbe de rétention (h_g), par la réalisation des courbes de conductivité hydrauliques $K(\theta)$ et des courbes de rétention capillaires $h(\theta)$. L'objectif est d'évaluer, à des fins de classification, les

propriétés hydrodynamiques des différents matériaux anthropiques qui composent les profils de sols urbains étudiés;

4. Caractériser les sites anthropiques urbains fortement contaminés à l'aide de différentes techniques minéralogiques (Diffraction aux Rayons X, Microscopie Électronique par Balayage, Microsonde électronique) afin d'identifier les phases métallifères (ex. les phases sulfures), tant au niveau de la fraction fine que de la fraction grossière. L'objectif est d'évaluer la contamination des métaux tant en surface qu'à l'intérieur des particules de sol. Ensuite, évaluer l'apport réel en métaux provenant de la fraction grossière des sols anthropiques urbains fortement contaminés;
5. Les horizons de scories se caractérisent par un risque de dissolution des métaux plus élevé que les horizons de surface et les horizons de profondeur formés de débris de construction et de fragments de roche. Par conséquent, il importe d'étudier les mécanismes et les facteurs affectant le relargage des métaux (Pb, Zn, Mn, Cu, Ni et Cr) provenant des horizons de scories, au sein de la solution du sol;
6. Réviser le Système Canadien de Classification des Sols afin d'introduire un ordre spécifique aux sols anthropiques urbains.

ANNEXE I

ÉTUDE MINÉRALOGIQUE DES HORIZONS ANTHROPIQUES PAR DIFFRACTION AUX RAYONS X



Unité de recherche et de service en technologie minérale
de l'Abitibi-Témiscamingue

445, boul. de l'Université
Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4

Tél.: (819) 762-0971 poste 2558 • Fax: (819) 797-6672

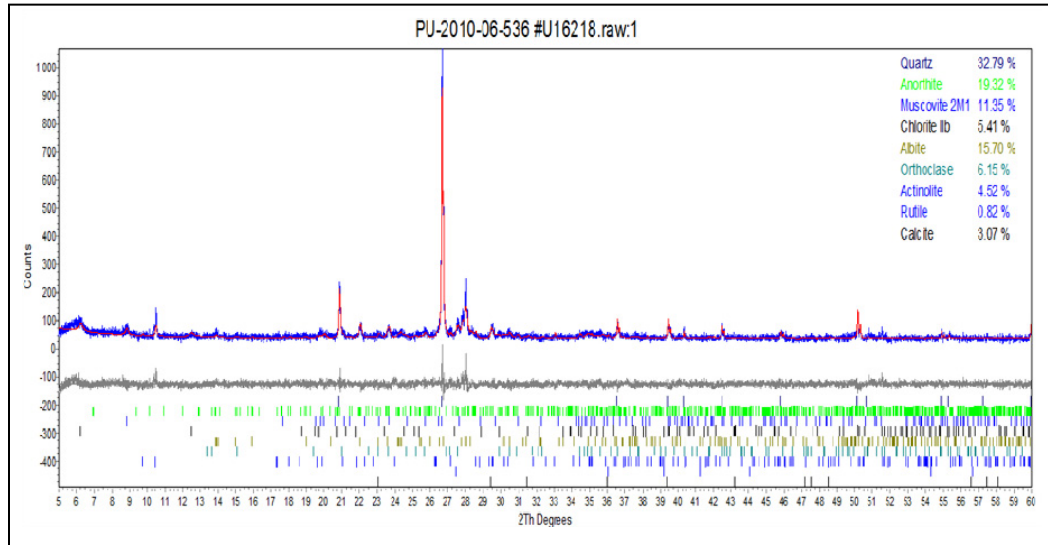


Figure-A I-1 Horizon de surface (0-55 cm) profil 1

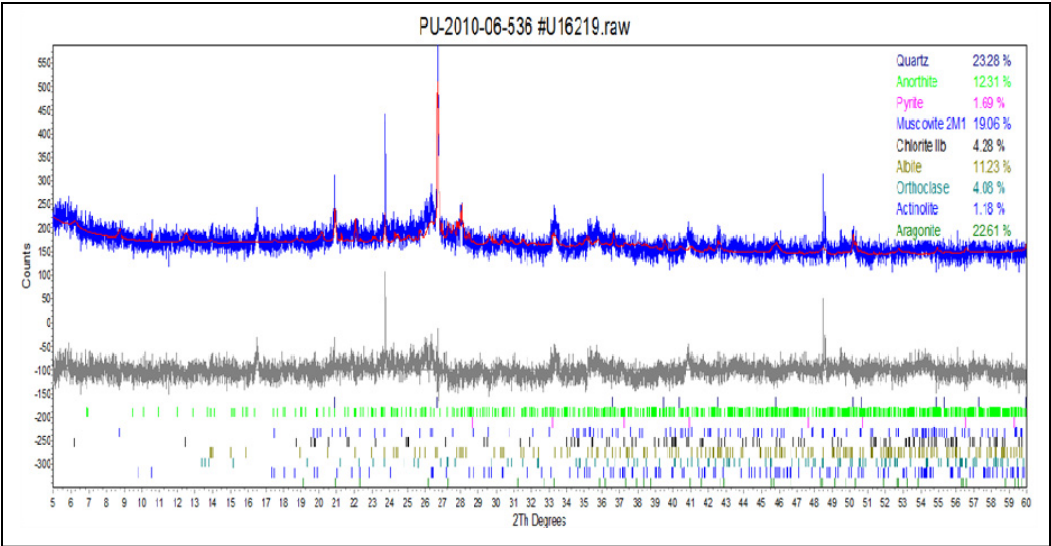


Figure-A I-2 Horizon de scories (55-80 cm) profil 1

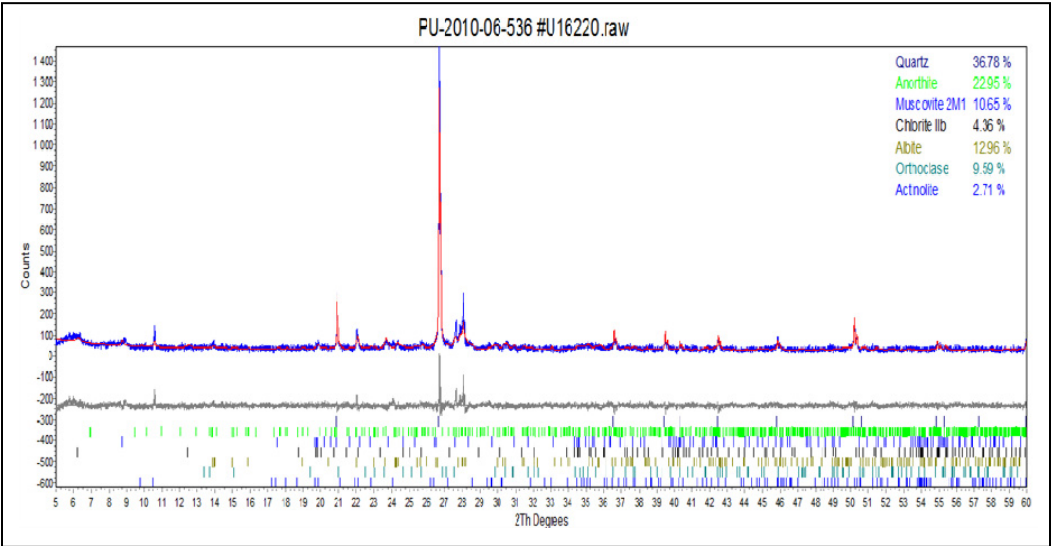


Figure-A I-3 Horizon de profondeur (80-200 cm) profil 1

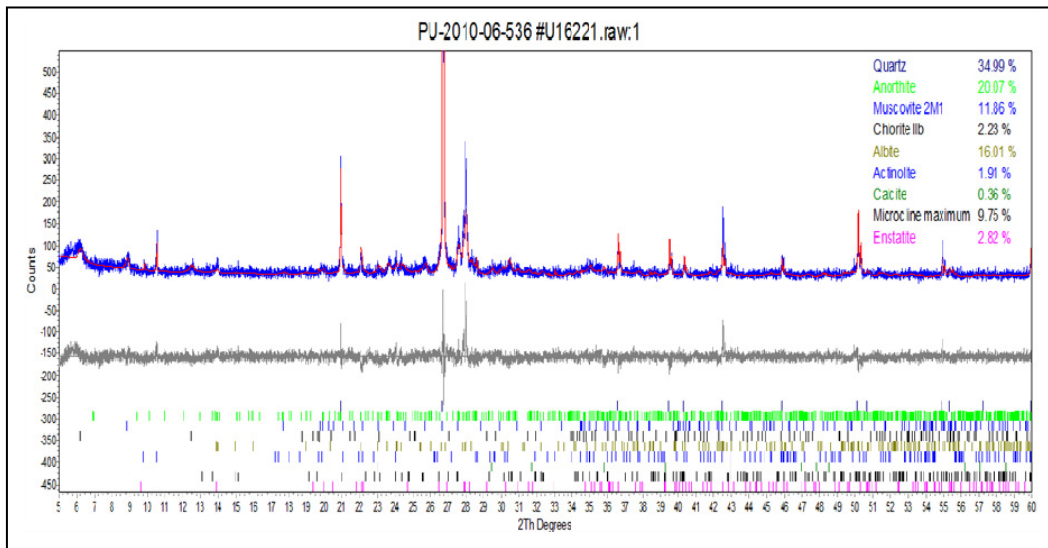


Figure-A I-4 Horizon de profondeur (200-230 cm) profil 1

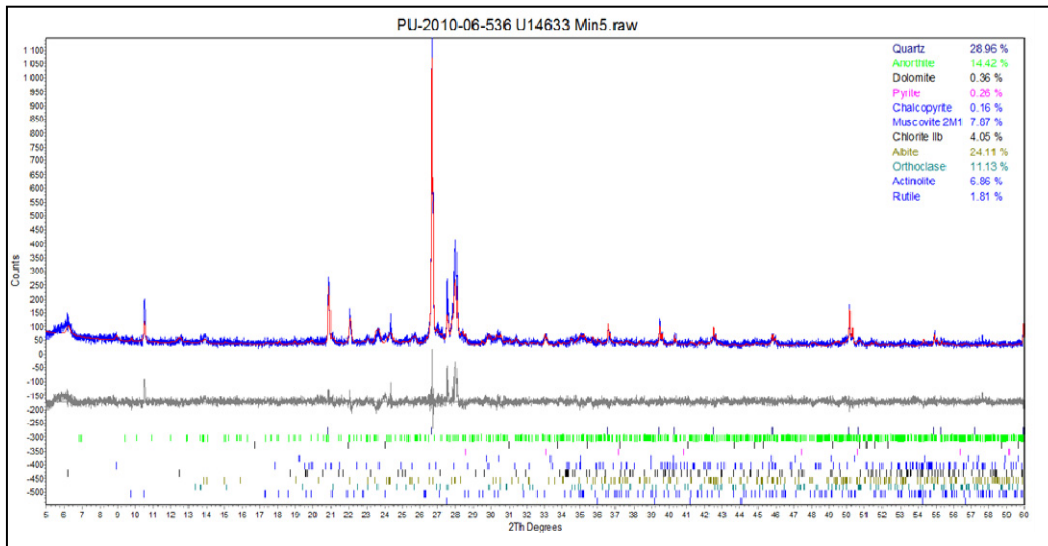


Figure-A I-5 Horizon de profondeur (230-260 cm) profil 1

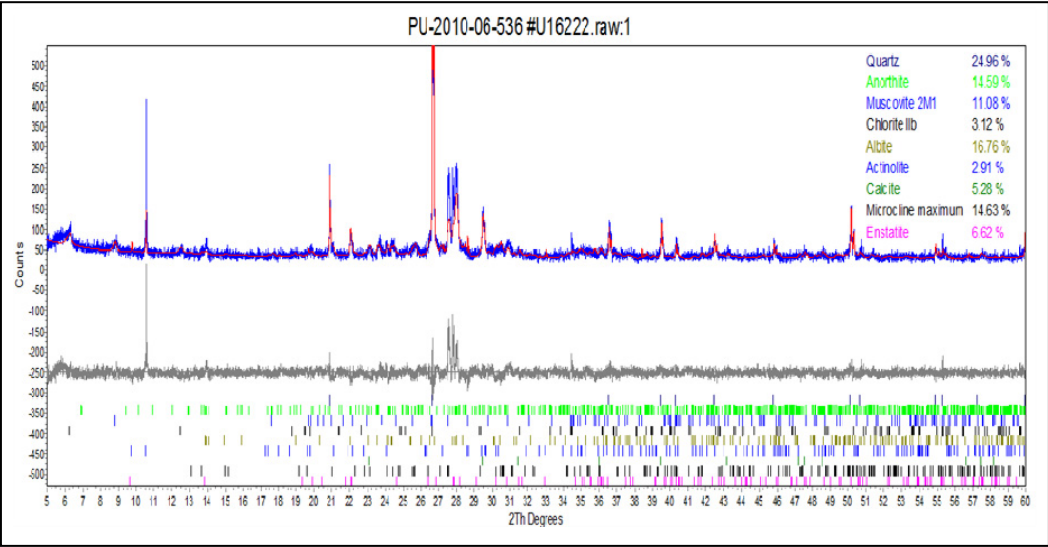


Figure-A I-6 Horizon de surface (0-70 cm) profil 2

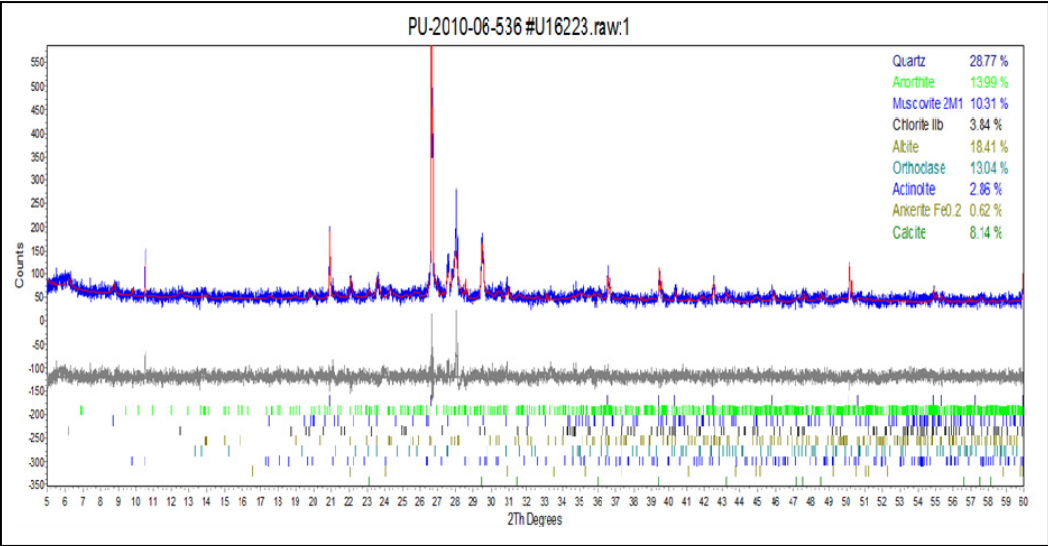


Figure-A I-7 Horizon de surface (0-35 cm) profil 3

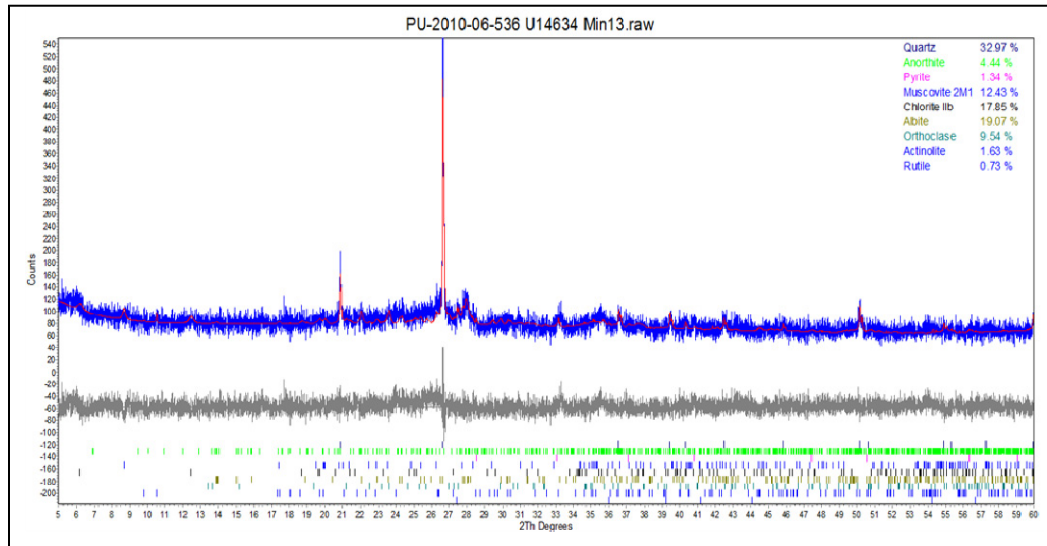


Figure-A I-8 Horizon de scories (35-50 cm) profil 3

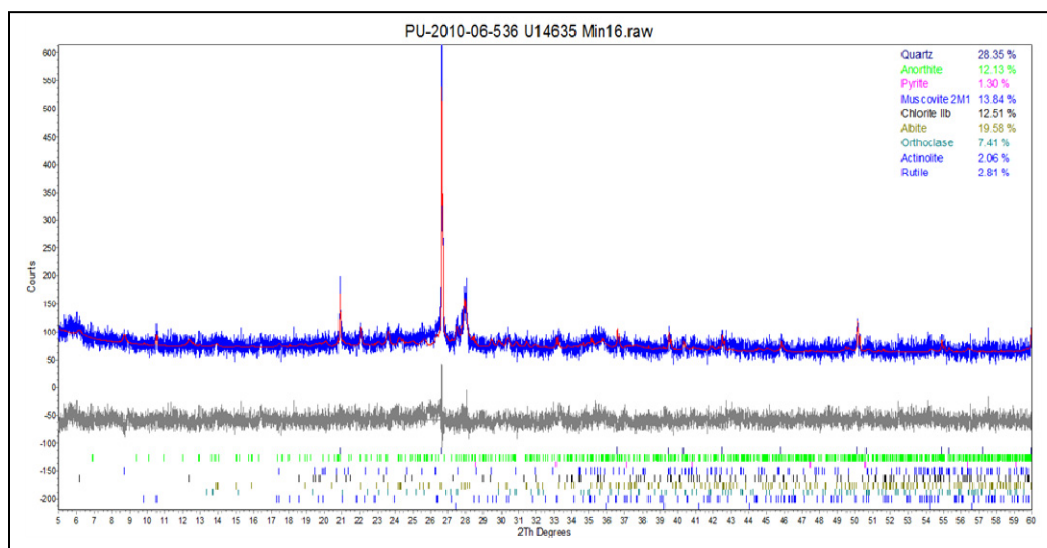


Figure-A I-9 Horizon de scories (230-280 cm) profil 3

ANNEXE II

RÉPARTITION DES MÉTAUX LOURDS (PB, ZN, MN ET CU) ENTRE LES FRACTIONS FINES ET LES FRACTIONS GROSSIÈRES CORRESPONDANTES

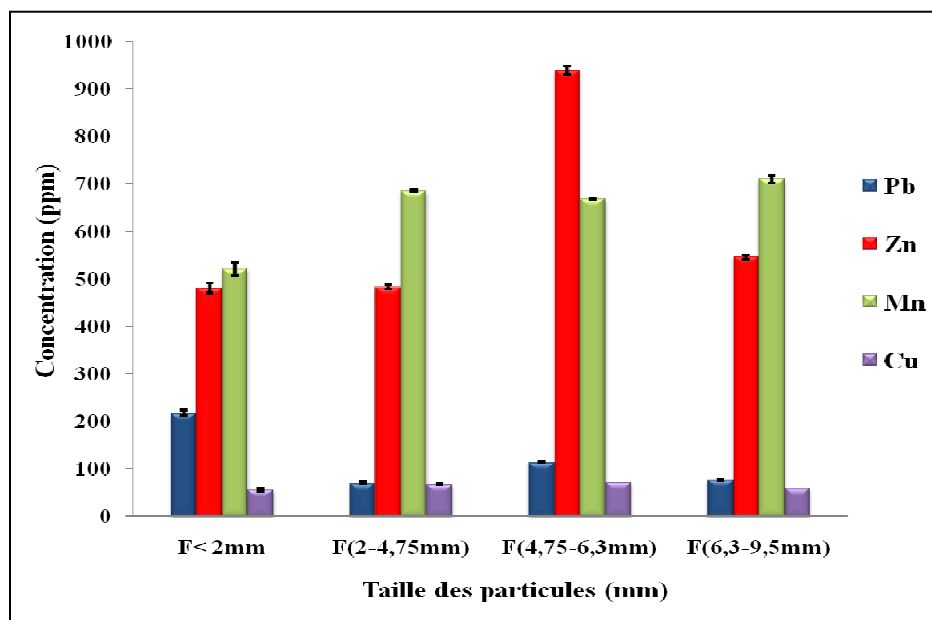


Figure-A II-1 Étude des métaux dans l'horizon de surface (0-55 cm)
Profil 1

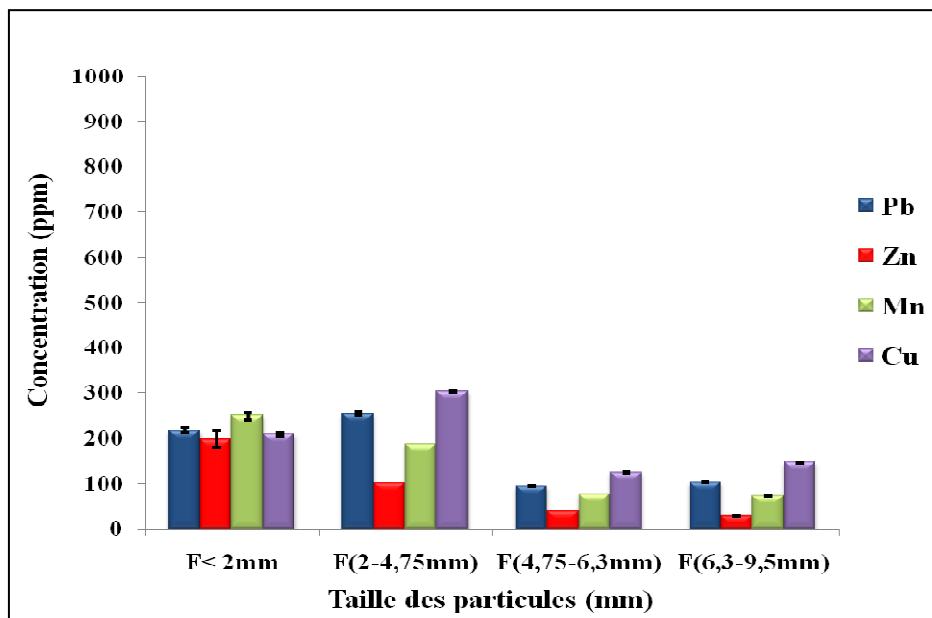


Figure-A II-2 Étude des métaux dans l'horizon de scories (55-80 cm)
Profil 1

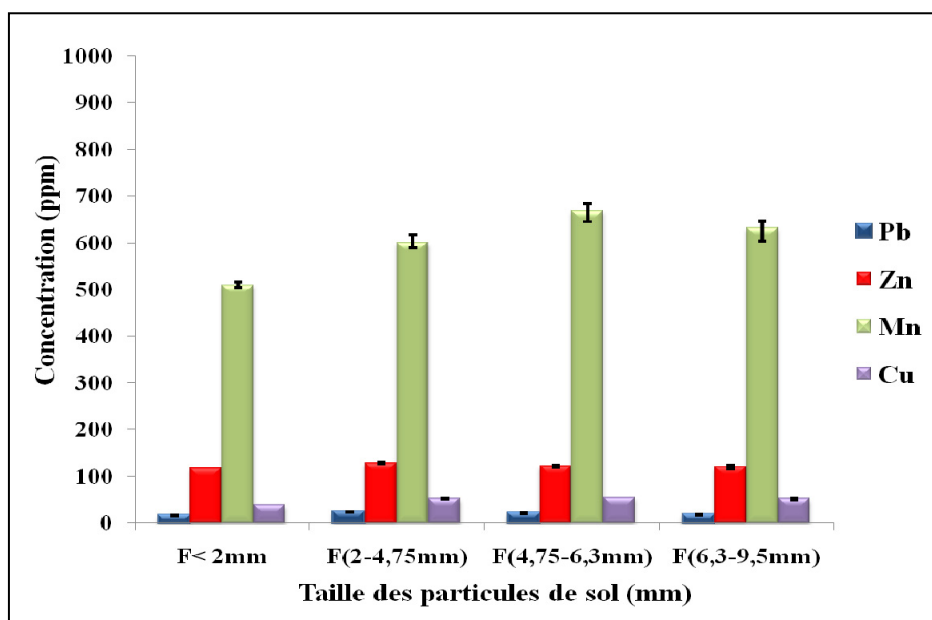


Figure-A II-3 Étude des métaux dans l'horizon de profondeur (80- 200 cm)
Profil 1

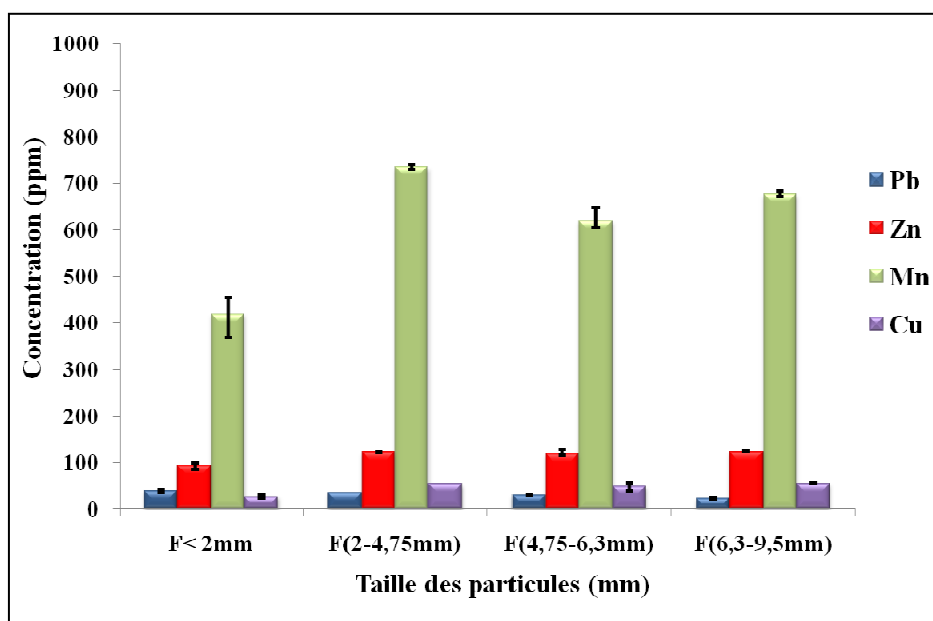


Figure-A II-4 Étude des métaux dans l'horizon de profondeur (200-230 cm)
Profil 1

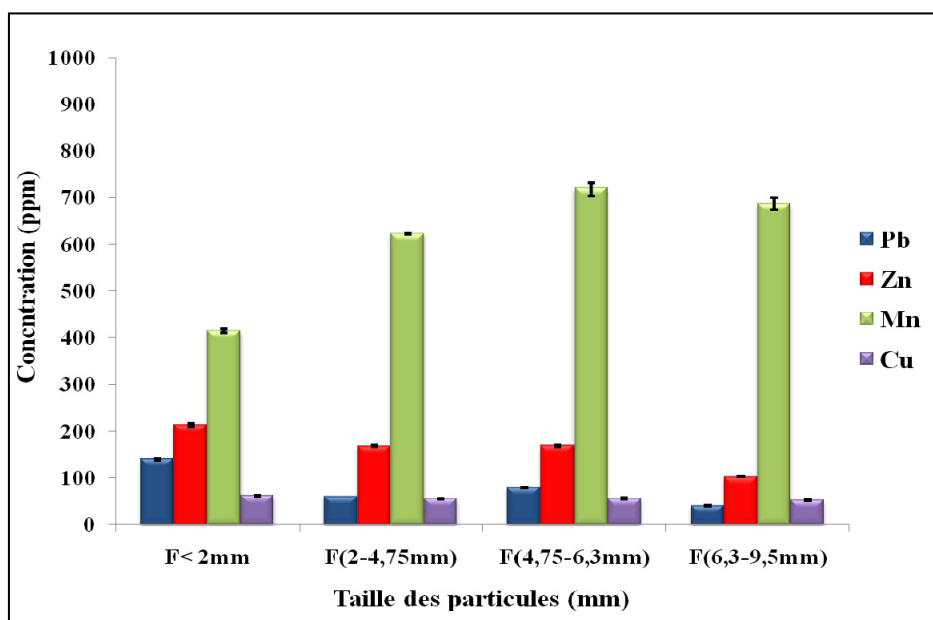


Figure-A II-5 Étude des métaux dans l'horizon de surface (0-70 cm)
Profil 2

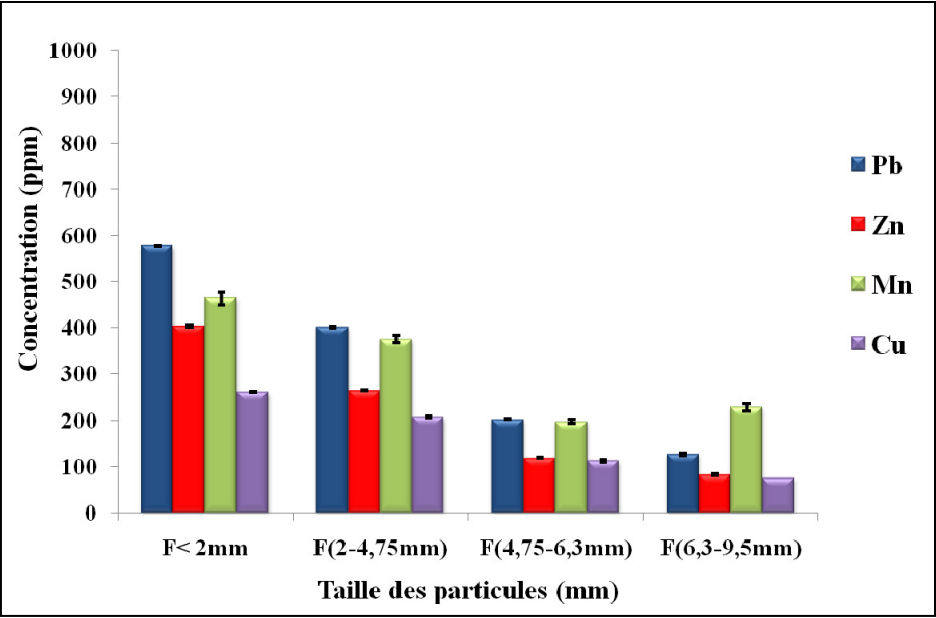


Figure-A II-6 Étude des métaux dans l’horizon de scories (70-90 cm)
Profil 2

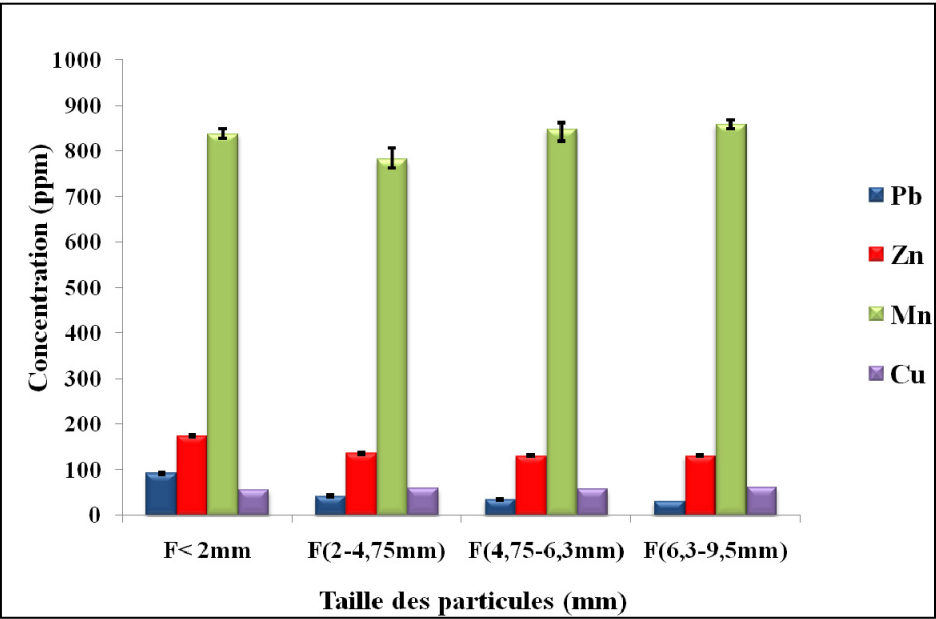


Figure-A II-7 Étude des métaux dans l’horizon de profondeur (90-140 cm)
Profil 2

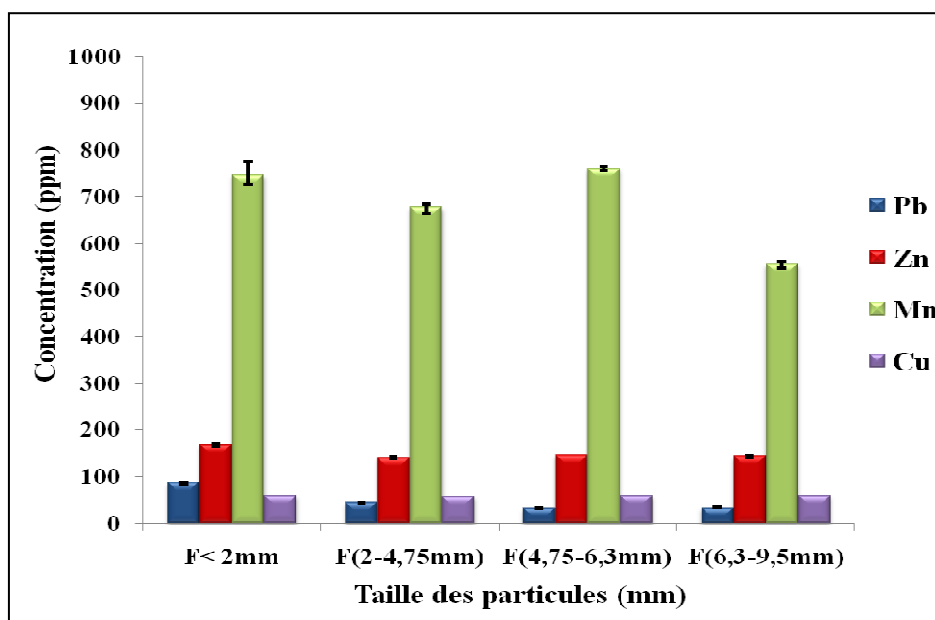


Figure-A II-8 Étude des métaux dans l'horizon de profondeur (140-190 cm)
Profil 2

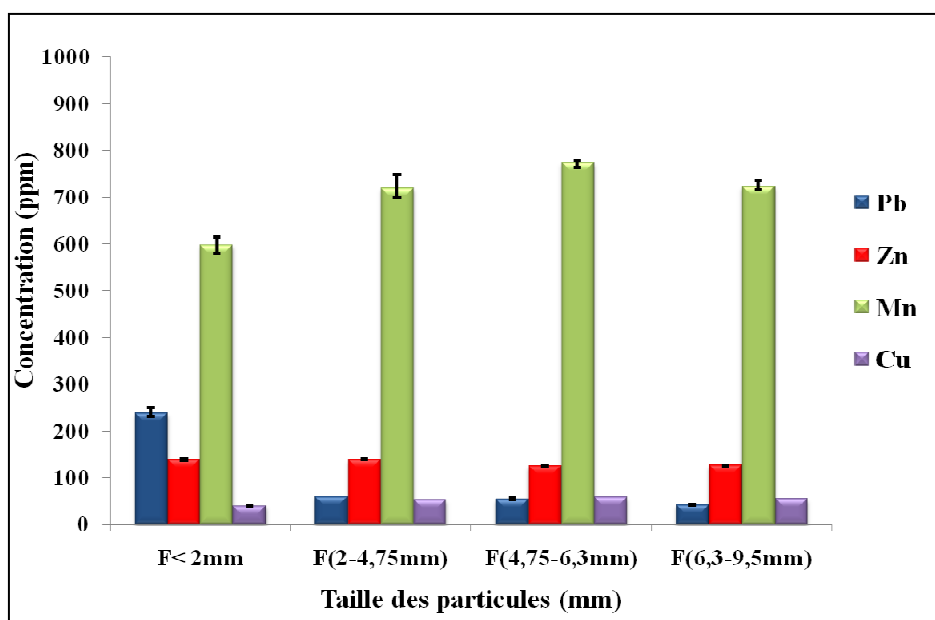


Figure-A II-9 Étude des métaux dans l'horizon de profondeur (190-260 cm)
Profil 2

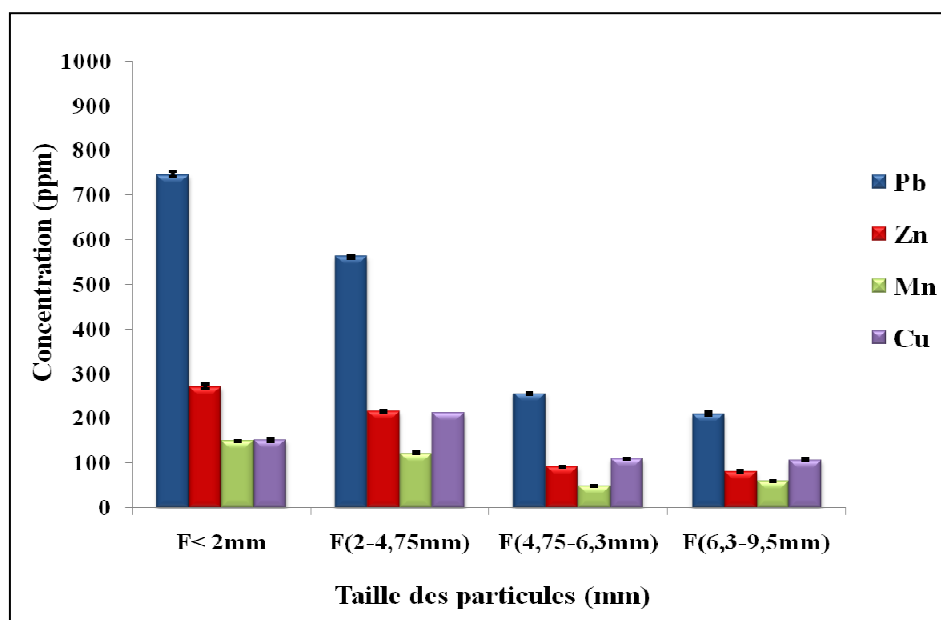


Figure-A II-10 Étude des métaux dans l'horizon de scories (260-290 cm)
Profil 2

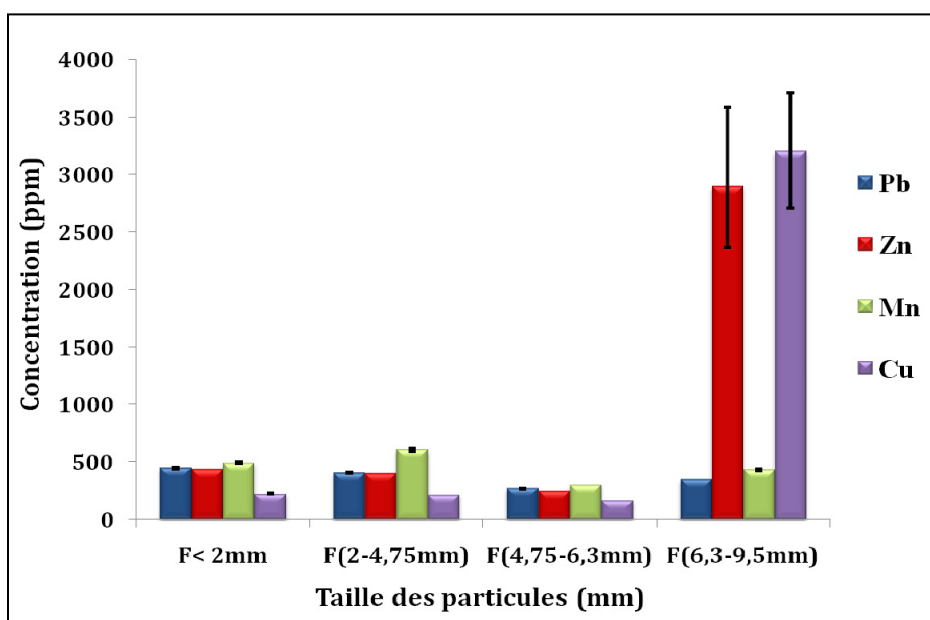


Figure-A II-11 Étude des métaux dans l'horizon de surface (0-35 cm)
Profil 3

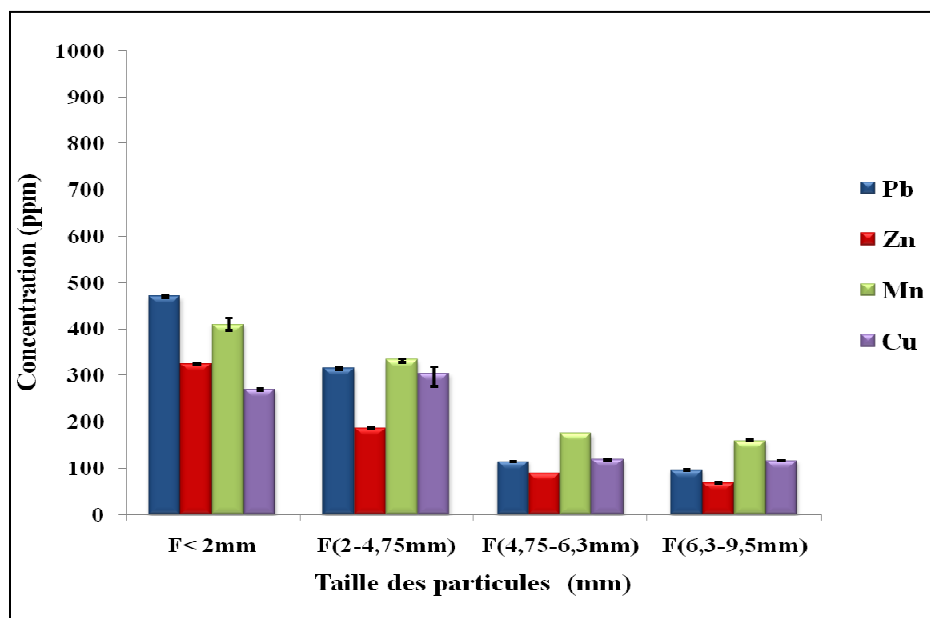


Figure-A II-12 Étude des métaux dans l'horizon de scories (35-50 cm)
Profil 3

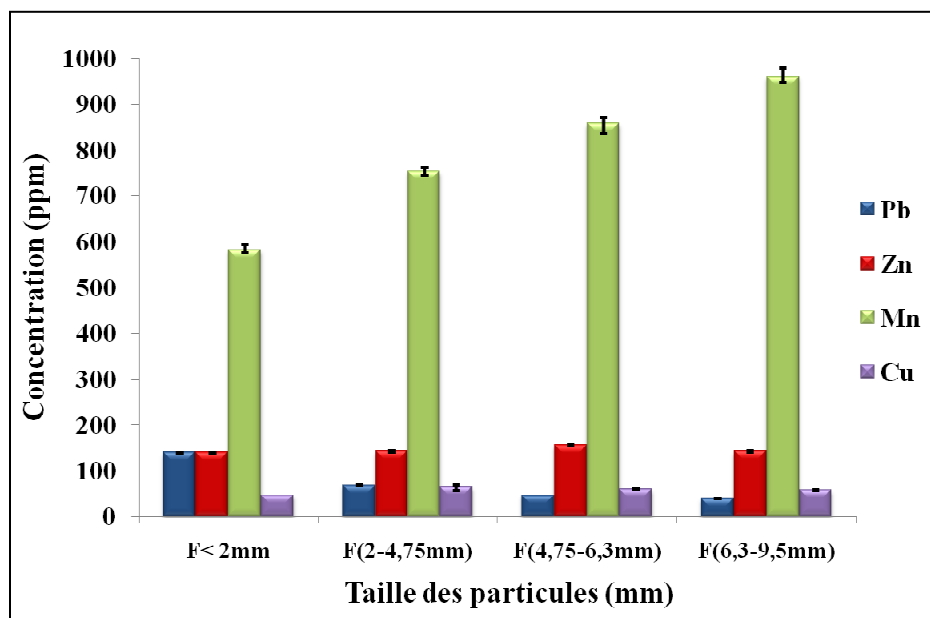


Figure-A II-13 Étude des métaux dans l'horizon de profondeur (50-190 cm)
Profil 3

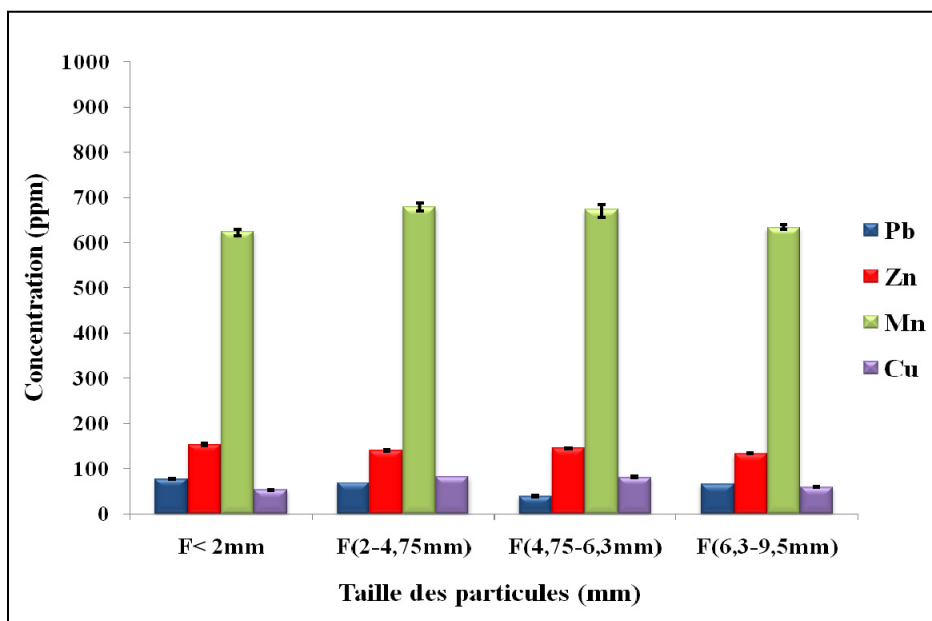


Figure-A II-14 Étude des métaux dans l'horizon de profondeur (190-230 cm)
Profil 3

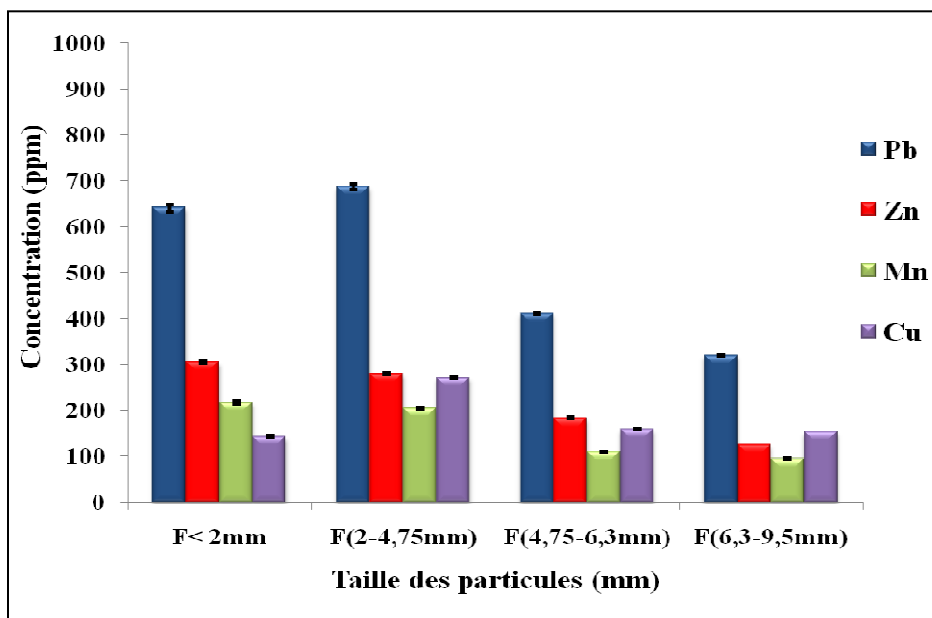


Figure-A II-15 Étude des métaux dans l'horizon de scories (230-280 cm)
Profil 3

ANNEXE III

CALCUL DES APPORTS MASSIQUES EN MÉTAUX PROVENANT DES FRACTIONS DES DIFFÉRENTS HORIZONS ANTHROPIQUES ÉTUDIÉS

Tableau-A III-1 Horizon de surface (0-55 cm) Profil 1

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	13.7	70.2	482.4	685.1	67.5	9.62	66.1	93.86	9.25				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	8.12	114.17	938.87	668.67	70.77	9.27	76.24	54.3	5.75				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	6.12	76.74	547.61	711.67	58.66	4.7	33.51	43.55	3.59				
FG totale (2-9.5 mm)	27.94					23.59	175.85	191.71	18.59	13.14	35.66	32.7	31.5
Fraction fine (< 2mm)	72.06	216.4	482	522.7	56.1	155.94	347.33	376.66	40.42	86.86	64.34	67.3	68.5
masse totale du métal (mg/kg sol sec)	100					179.53	493.18	568.37	59.01				

Tableau-A III-2 Horizon de scories (55-80 cm) Profil 1

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	20.55	254.1	100.6	187.1	303.1	52.22	20.67	38.45	62.29				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	16.75	94.11	38.65	77.36	123.16	15.76	6.47	12.96	20.63				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	14.6	102.8	28.82	73.11	145.75	15	4.21	10.67	21.28				
FG totale (2-9.5 mm)	51.9					82.98	31.35	62.08	104.2	44.37	24.87	33.98	50.92
Fraction fine (< 2mm)	48.1	216.25	196.9	250.7	208.8	104.02	94.71	120.59	100.43	55.63	75.13	66.02	49.08
Masse totale du métal (mg/kg sol)	100					187	126.06	182.67	204.63				

Tableau-A III-3 Horizon de profondeur (80-200 cm) Profil 1

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	12.4	23.34	128.66	598.9	51.49	2.89	15.95	74.26	6.38				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	2.79	19.9	121.77	667.78	54.18	0.55	3.4	18.63	1.51				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	2.81	18.05	119.64	630.28	51.32	0.51	3.36	17.71	1.44				
FG totale (2-9.5 mm)	18					3.95	22.71	110.6	9.33	20.53	19.1	20.95	22.98
Fraction fine (< 2mm)	82	15.4	117.34	508.8	38.12	12.63	96.22	417.22	31.26	79.41	80.9	79.05	77.02
Masse totale du métal (mg/kg sol)	100					16.58	118.93	527.82	40.59				

Tableau-A III-4 Horizon de profondeur (200-230 cm) Profil 1

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	17.65	36.07	122.04	734.4	54.25	6.37	21.54	129.62	9.57				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	6.62	29.84	119.58	619.04	49.14	1.97	7.92	40.98	3.25				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	7.66	23.01	123.43	676.61	55.5	1.76	9.45	51.83	4.25				
FG totale (2-9.5 mm)	31.93					10.1	38.91	222.43	17.07	27.18	37.53	43.76	47.41
Fraction fine (< 2mm)	68.07	39.75	95.15	420	27.81	27.06	64.77	285.89	18.93	72.82	62.47	56.24	52.59
Masse totale du métal (mg/kg sol)	100					37.16	103.68	508.32	36				

Tableau-A III-5 Horizon de profondeur (230-260 cm) Profil 1

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
FG totale (2-9.5 mm)	0					0	0	0	0	0	0	0	0
Fraction fine (< 2mm)	100	14.07	104.15	297.8	27.61	14.07	104.15	297.8	27.61	100	100	100	100
Masse totale du métal (mg/kg sol)	100					14.07	104.15	297.8	27.61				

Cet horizon ne comporte pas de fraction grossière.

Tableau-A III-6 Horizon de surface (0-70 cm) Profil 2

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	17.08	60.7	168.07	622.05	55.21	10.37	28.71	106.25	9.43				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	6.45	79.44	168.85	719.78	56.04	5.11	10.89	46.42	3.61				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	7.1	40.91	102.8	686.08	51.48	2.9	7.3	48.71	3.65				
FG totale (2-9.5 mm)	30.63					18.38	46.9	201.38	16.69	15.91	24.1	41.17	28.08
Fraction fine (< 2mm)	69.37	140.07	212.92	414.8	61.62	97.16	147.7	287.75	42.75	84.09	75.9	58.83	71.92
Masse totale du métal (mg/kg sol)	100					115.54	194.6	489.13	59.44				

Tableau-A III-7 Horizon de scories (70-90 cm) Profil 2

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	11.39	402.37	265.02	374.5	207.34	45.83	30.18	42.65	23.62				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	6.65	201.84	118.69	197.2	112.79	13.42	7.89	13.11	7.5				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	6.09	127.21	82.58	229.7	75.57	7.75	5.03	13.99	4.6				
FG totale (2-9.5 mm)	24.13					67	43.1	69.75	35.72	13.26	12.33	16.49	15.27
Fraction fine (< 2mm)	75.87	577.5	403.75	465.42	261.28	438.15	306.32	353.11	198.23	86.74	87.67	83.51	84.73
Masse totale du métal (mg/kg sol)	100					505.15	349.42	422.86	233.95				

Tableau-A III-8 Horizon de profondeur (90-140 cm) Profil 2

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	18.86	41.6	134.6	780.94	58.21	7.84	25.38	147.28	10.98				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	8.09	34.39	130.52	847.32	55.89	2.78	10.56	68.55	4.52				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	8.09	30.45	130.5	858.53	59.8	2.46	10.56	69.45	4.84				
FG totale (2-9.5 mm)	35.04					13.08	46.5	285.28	20.34	18.12	29.12	34.42	36.6
Fraction fine (< 2mm)	64.96	90.99	174.26	836.55	54.23	59.11	113.2	543.42	35.23	81.88	70.88	65.58	63.4
Masse totale du métal (mg/kg sol)	100					72.19	159.7	828.7	55.57				

Tableau-A III-9 Horizon de profondeur (140-190 cm) Profil 2

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	21	43.92	140.5	676.2	57.03	9.22	29.5	142	11.98				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	9.06	32.02	145.73	758.98	58.24	2.9	13.2	68.76	5.28				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	9.64	33.32	142.49	555.64	58.92	3.21	13.74	53.56	5.68				
FG totale (2-9.5 mm)	39.7					15.33	56.44	264.32	22.94	22.7	35.89	37.04	39.41
Fraction fine (< 2mm)	60.3	86.59	167.16	745.1	58.5	52.21	100.8	449.29	35.27	77.3	64.11	62.96	60.59
Masse totale du métal (mg/kg sol)	100					67.54	157.24	713.61	58.21				

Tableau-A III-10 Horizon de profondeur (190-260 cm) Profil 2

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique(%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	18.58	59.4	137.74	720.8	52.66	11.04	25.59	133.92	9.78				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	6.92	54.83	124.65	774.08	57.93	3.79	8.62	53.57	4				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	8	42.46	125.43	723.72	54.69	3.4	10.03	57.9	4.37				
FG totale (2-9.5 mm)	33.5					18.23	44.54	245.39	18.15	10.36	32.74	38.14	40.61
Fraction fine (< 2mm)	66.5	237.3	137.58	598.42	39.91	157.8	91.49	397.95	26.54	89.64	67.26	61.86	59.39
Masse totale du métal (mg/kg sol)	100					176.03	136.03	643.34	44.69				

Tableau-A III-11 Horizon de scories (260-290 cm) Profil 2

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	17.4	563.73	215.35	122.21	212.03	98.09	37.47	21.26	36.89				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	12.68	256.62	92.49	49.35	110.58	32.54	11.73	6.26	14.02				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	15.12	210.09	81.34	59.96	107.57	31.76	12.3	9.06	16.26				
FG totale (2-9.5 mm)	45.2					162.39	61.5	36.58	67.17	28.45	29.21	30.83	44.55
Fraction fine (< 2mm)	54.8	745.31	272	149.75	152.51	408.43	149.06	82.06	83.57	71.55	70.79	69.17	55.45
Masse totale du métal (mg/kg sol)	100					570.82	210.56	118.64	150.74				

Tableau-A III-12 Horizon de surface (0-35 cm) Profil 3

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	13	404.87	405.21	601.6	215.7	52.63	52.68	78.21	28.04				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	5.84	268.33	250.25	302.02	167.66	15.67	14.61	17.64	9.79				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	6.91	346.22	2898.24	431.23	3202.45	23.92	200.27	29.8	221.29				
FG totale (2-9.5 mm)	25.75					92.22	267.56	125.65	259.12	21.83	45.07	25.68	60.88
Fraction fine (< 2mm)	74.25	444.75	439.2	489.74	224.21	330.23	326.11	363.63	166.48	78.17	54.93	74.32	39.12
Masse totale du métal (mg/ kg de sol)	100					422.45	593.67	489.28	425.6				

Tableau-A III-13 Horizon de scories (35-50 cm) Profil 3

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ft ion Grossière (2-4.75 mm)	16.73	315.52	186.72	332.87	303.56	52.79	31.24	55.69	50.78				
Ft ion Grossière (4.75-6.3 mm)	10.5	114.53	89.34	174.68	118.17	12.02	9.38	18.34	12.41				
Ft ion Grossière (6.3-9.5 mm)	9.96	95.75	68.62	158.83	115.76	9.54	6.83	15.82	11.53				
FG totale (2-9.5 mm)	37.19					74.35	47.45	89.85	74.72	20.13	18.87	25.89	30.59
Fraction fine (< 2mm)	62.81	469.6	324.73	409.4	269.92	294.95	203.96	257.14	169.54	79.87	81.13	74.11	69.41
Masse totale du métal (mg/kg sol)	100					369.3	251.41	346.99	244.26				

Tableau-A III-14 Horizon de profondeur (50-190 cm) Profil 3

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	22.54	68.57	142.4	753.2	64.31	15.46	32.1	169.77	14.49				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	7.24	46.55	155.25	857.12	59.5	3.37	11.24	62.05	4.31				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	6.67	38.98	142.32	958.69	57.4	2.6	9.49	63.94	3.83				
FG totale (2-9.5 mm)	36.45					21.43	52.83	295.76	22.63	19.52	37.24	44.44	43.84
Fraction fine (< 2mm)	63.55	139.03	140.08	581.9	45.62	88.35	89.02	369.8	28.99	80.48	62.76	55.56	56.16
Masse totale du métal (mg/kg sol)	100					109.78	141.85	665.56	51.62				

Tableau-A III-15 Horizon de profondeur (190-230 cm) Profil 3

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	18.25	68.48	139.31	679.39	81.82	12.5	25.42	123.99	14.93				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	8.17	39.4	144.34	673.53	81.19	3.22	11.79	55.03	6.63				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	8.54	65.05	133.16	633.16	59.06	5.55	11.37	54.07	5.04				
FG totale (2-9.5 mm)	34.96					21.37	48.58	233.09	26.6	29.71	32.83	36.44	43.59
Fraction fine (< 2mm)	65.04	77.74	152.78	625.04	52.92	50.56	99.37	406.53	34.42	70.29	67.17	63.56	56.41
Masse totale du métal (mg/ kg de sol)	100					71.93	147.95	639.62	61.02				

Tableau-A III-16 Horizon de scories (230-280 cm) Profil 3

	Proportion massique représentée (%)	Concentration analysée (ppm)				Concentration pondérale (mg/ kg de fraction granulométrique)				Apport massique (%)			
		Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu	Pb	Zn	Mn	Cu
Ftion Grossière (2-4.75 mm)	21.42	686.68	279.22	203.81	270.15	147.09	59.81	43.66	57.87				
Ftion Grossière (4.75-6.3 mm)	11.56	410.75	182.65	108.85	158.31	47.48	21.11	12.58	18.3				
Ftion Grossière (6.3-9.5 mm)	11.4	319.93	124.34	95.22	152.89	36.47	14.17	10.85	17.43				
FG totale (2-9.5 mm)	44.38					231.04	95.09	67.09	93.6	39.32	35.93	35.81	54.22
Fraction fine (< 2mm)	55.62	641	304.8	216.26	142.09	356.52	169.53	120.28	79.03	60.68	64.07	64.19	45.78
Masse totale du métal (mg/kg sol)	100					587.56	264.62	187.37	172.63				

BIBLIOGRAPHIE

- Acosta, J.A., Faz Cano, A., Arocena, J.M., Debela, F., Martinez-Martinez, S. 2009. «Distribution of metals in soil particle size fractions and its implications to risk assessment of playgrounds in Murcia City (Spain) ». *Geoderma*, 149, p. 101- 109.
- Al-Rajhi, M.A.; Al-Shayeb, S.M.; Seaward, M.R.D.; Edwards, H.G.M. 1996. « Particle size effect for metal pollution analysis of atmospherically deposited dust ». *Atmospheric Environment*, Vol.30, No 1, p. 145-153.
- Biasioli, M., Barberis, R., Ajmone-Marsan, F. 2006. « The influence of a large city on some soil properties and metals content ». *Science of The Total Environment*, Vol. 356, p. 154-164.
- Biggins, P. D. E., and R. M, Harrison. 1980. « Chemical Speciation of Lead Compounds in Street Dusts ». *Environmental Science and Technology*, 14, p.336–339.
- Boudreault, Jean-philippe, Dubé, Jean-Sébastien, Chouteau, Michel, Hardy, Éric et Winiarski, Thierry. 2005. Application de la géophysique à la caractérisation des remblais hétérogènes urbains. In *Americana*. Montréal, Canada.
- Boudreault, Jean-philippe, Dubé, Jean-Sébastien, Chouteau, Michel, Hardy, Éric et Winiarski, Thierry. 2010. « Geophysical characterization of contaminated urban fills». *Engineering geology*, Vol. 116, N°3-4, p.196-206.
- Bray J., R. Viscarra Rossel, R., McBratney A. B. 2008. « Diagnostic screening of urban soil contaminants using diffuse reflectance spectroscopy ». *Soil Research* 47(4), p. 433-442.
- Burghardt, W. 1994. « Soil in urban and industrial environments ». *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Vol. 157 (3), p. 205-214.
- Caillier, Michel. 2005. SLS-12416. *Genèse et Classification des sols : notes du cours SLS-12416*. Programme de Baccalauréat en agronomie. Québec : Université Laval, pagination multiple. 124 pages.
- Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec (CEAEQ). 2006. *Détermination des métaux dans les solides : méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon*, MA. 200 – Mét1.1, Rév. 3, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 38 pages.

- Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec (CEAEQ). 2006. *Détermination du carbone organique total dans les solides : dosage par titrage*, MA. 405 – C 1.0, Rév. 3, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 9 pages.
- Cescas, Michel. 2005. SLS-12418. *Chimie des sols : notes du cours SLS-12418*. Programme de Baccalauréat en agronomie. Québec : Université Laval, pagination multiple. 142 pages.
- Corti, G., Ugolini, F.C, Agnelli, A. 1998. « Classing the soil skeleton (Greater than two millimeters): Proposed Approach and Procedure ». *Soil Science Society America Journal*, 62, p. 1620-1629.
- Craul, Phillip J. 1985. « A description of urban soils and their desired characteristics ». *Journal of Arboriculture*, vol. 11, p. 330-339.
- Delville, Nathalie. 2004. « Étude minéralogique et physico-chimique des mâchefers d'incinération des ordures ménagères (MIOM) en vue d'une utilisation en technique routière ». Thèse de doctorat en Sciences fondamentales spécialité Pétrologie, Clermont Ferrand, Université Blaise Pascal, 320 pages.
- Dermont, G., Bergeron, M., Richer-Laflèche, M., Mercier, G. 2005. Caractérisation par une approche multidisciplinaire de sols urbains contaminés par les métaux dans le cadre d'une stratégie de décontamination. In *The International Environmental Technology Trade Show and Conference «Americana»*. (Montréal April 6-8, 2005) 31 pages. 6th biennial Edition.
- Dermont, Gérard. 2008. «Sols pollués par les métaux résultant de l'enfouissement de déchets industriels (Montréal, Canada) : géochimie, spéciation des métaux, et décontamination par flottation ». Thèse de doctorat en Sciences de la Terre et Environnement, Québec, INRS-ÉTÉ, 422 pages.
- Dubé, Jean-Sébastien. 1997. «Application d'un protocole analytique à l'évaluation de la distribution géochimique des métaux lourds dans les sols contaminés». Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Québec, Université Laval, 123 pages.
- Duchaufour, Philippe. 1997. *Sol, Végétation, Environnement : Abrégé de Pédologie*, 5^{ème} édition. Paris : Masson, 291 pages.
- Duchesne, Josée et Mercier, Guy. 2003. « Établissement d'une méthode de caractérisation minéralogique décrivant les sols contaminés par le plomb ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40, p.731-741.
- Effland, William et Pouyat, Richard. 1997. « The genesis, classification, and mapping of soils in urban areas ». *Urban Ecosystems*, 1, p. 217-228.

- El Khalil, Hicham, Schwartz, Christophe, Kubinok, Jochen, Boularbah Ali. 2007. Origine des métaux disponibles dans les sols urbains de Marrakech. In *Journées Nationales de l'Étude des Sols*. (Angers 3-4-5 avril 2007) 2 pages.
- El Khalil, Hicham, Schwartz, Christophe, Ouafae, Elhamaniani, Kubiniok, Jochen, Morel, Jean Louis, Boularbah, Ali. 2008. « Contribution of Technic Materials to the Mobile Fraction of Metals in Urban Soils in Marrakech ». *Journal Soil Sediments*, 8 (1) p.17-22.
- Eusden, J.D.Jr., Eighmy, T.T., Hockert, K., Holland, E., Marsella, K. 1999. « Petrogenesis of municipal solid waste combustion bottom ash ». *Applied Geochemistry*, 14(8) p.25-43.
- Expert Enviroconseil. 2002. *Rapport synthèse sur la situation environnementale à la cour Glen. Montréal, Centre universitaire de santé McGill*. « Rapport technique du CUSM ». Montréal : Centre Universitaire de Santé Mc Gill, 34 pages.
- Eypert-Blaison C., Kohler A., Lhote F. et Yvon J. 2000. « Spéciation des métaux dans les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères et reconstitution des réactions ». *Les techniques de l'industrie Minérale*, n°6, p. 41-52.
- Florentin, Louis, Schwartz, Christophe et Morel, Jean-Louis, 2000. « Apports de la pédologie à l'étude des sols industriels ». *Symposium oral présenté au congrès de la science du sol*. N°28. En ligne. <http://natres.psu.ac.th/Link/SoilCongress/bdd/symp28/1258-r.pdf>. Consulté le 15 décembre 2008.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2006. « Guidelines for soil description, fourth edition ». En ligne. 97 pages. ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/guidel_soildescr.pdf. Consulté le 15 décembre 2008.
- Forstner, U. 1980. « Trace metal analysis of polluted sediments part 1, assessment of sources and intensities ». *Environmental Technology Letters*, 1, p. 494-505.
- Freyssinet, P., Piantone, P., Azaroual, M., Itard, Y., Clozel, B. & al. 1998. *Évolution chimique et minéralogique des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères au cours de la maturation*, Éditions BRGM : Orléans, 138 pages.
- Galvez-Cloutier Rosa et Dubé, Jean-Sébastien. 1998. « Approche méthodologique pour la transformation progressive d'un centre de transfert en centre de traitement de substances dangereuses. Partie 2 : étude de faisabilité du lavage chimique des sols contaminés ». *Vecteur Environnement*, Vol. 31, n° 3, p. 30-37.

- Goutaland, David. 2008. « Caractérisation hydrogéophysique d'un dépôt fluvioglaciaire. Évaluation de l'effet de l'hétérogénéité hydrodynamique sur les écoulements en zone non-saturée ». Thèse de doctorat, Lyon Institut National des Sciences Appliquées, 243 pages.
- Gregorich, E.G., Kachanoski, R.G., Voroney, R.P. 1988. «Ultrasonic dispersion of aggregates: distribution of organic matter in size fractions ». *Canadian Journal of Soil Science*, 68, 395-403.
- Hesse, P.R. 1971. «A textbook of chemical soil analysis». John Murray Publishers Ltd., London, 520 pages.
- International Union of Soil Science (IUSS) and World Reference Basis (WRB) Group. 2006. *World Reference Base for soil resources* 2006. «World Soil Resources», 2nd edition Reports N° 103. FAO, Rome, 128 pages.
- Jim, C.Y. 1997. «Urban soil characteristics and limitations for landscape planting in Hong Kong ». *Landscape and Urban Planning*, vol. 40, p. 235-249.
- Jim, C.Y. 1998. Soil characteristics and management in an urban park in Hong Kong. *Environmental Management*, vol. 22, no.5, p. 683-695.
- Kirby, Carl S. and Rimstidt J. Donald. 1993. « Mineralogy and Surface Properties of municipal solid waste ash ». *Environnemental Science Technology*, vol. 27, n° 4 p. 652-660.
- Kosse, A. 1990. « Diagnostic horizons in Anthrosols ». In *Reports on the international conference on soil classification, Alma-Ata, USSR Centre for International Projects, USSR State Committee for Environmental Protection*. (Moscow 12-16 September, 1988), p. 264–273. Ed B. G. Rozanov.
- Kosse, A. 2000. Pedogenesis in the Urban Environment. In *the First International Conference on Soils of Urban, Industrial, Traffic and Mining Areas*. Proceedings, Vol. 1. The Unknown Urban Soil detection, resources and faces. (Essen, Germany, July 12-18 2000), p.75-85.
- Lehmann, A and Stahr, K. 2007. « Nature and Significance of Anthropogenic Urban Soils ». *Journal Soils Sediments*, 7 (4), p.247-260.
- Ljung, K., Selinus, O., Berglund, M., Otabbong, E. 2006. « Metal and arsenic distribution in soil particle sizes relevant to soil ingestion by children». *Applied Geochemistry*, 21, p. 1613-1624.
- Lorenz K. and Kandeler E. 2005. « Biochemical characterisation of urban soil profiles from Stuttgart, Germany ». *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 37, p. 1373-1385.

- Lozet, J. et Matthieu, C. 1997. *Dictionnaire de la Science du Sol*, 2^{ème} édition. Paris : Lavoisier TEC & DOC, 488 pages.
- Martin-Garcia, JM., Delgado. G., Parraga, J.F., Gamiz, E. 1999. « Chemical, mineralogical and (micro) morphological study of coarse fragments in Mediterranean Red Soils ». *Geoderma*, 90, p.23-47.
- Massadeh, Adnan, and Qasem, Jaradat. 2006. « Average particle size ratios and chemical speciation of copper and zinc in road-dust samples ». In *Contaminated Soils, Sediments and Water*, sous la dir. d'Edward J. Calabrese, Paul T. Kostecki et James Dragun, p. 69-79. Edited by Springer.
- Mertenat, C. 2007. *Outils pour un langage commun: La construction d'un environnement durable autour du projet du CUSM au site Glen : outils d'engagement communautaire*. « Rapport technique CUSM », CE07-01F : CURA Mégaprojets au service des communautés - Making Megaprojects Work for Communities Montréal : Université Mc Gill, 28 pages.
- Miller, F.T, Guthrie, R.L. 1984. « Classification and distribution of soils containing rock fragments in the United States: Erosion and Productivity of Soils containing Rock Fragments ». *Soil Science Society of America*, 13, p.1-6.
- Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP). 2007. « Répertoire des terrains contaminés », In *le site du MDDEP*. En ligne. 45 pages.
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/terrains-contamines/recherche.asp>
 Consulté le 15 décembre 2008.
- Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP). 2008. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales. «Échantillonnage des sols », cahier 5. Québec, (Qc) : CEAEQ, 57 pages.
- Norra S., Fjer N., Li F., Chu X., Xie X. and Stübena D. 2008. «The influence of different land uses on mineralogical and chemical composition and horizonation of urban soil profiles in Qingdao, China ». *Journal Soils Sediments*, vol. 8 (1), p.4-16.
- Norra S., Lanka-Pandithaa, M., Kramar, U. and Stübena D. 2006. « Mineralogical and geochemical patterns of urban surface soils, the example of Pforzheim, Germany ». *Applied Geochemistry*, vol.21 (12), p. 2064-2081.
- Poesen, J and Lavee, H. 1994. « Rock fragments in top soils: significance and processes ». *Catena*, 23 (1-2), p.1-28.

- Puskas, I and Farsang, A. 2008. « Diagnostic indicators for characterizing urban soils of Szeged, Hungary ». *Geoderma*, vol. 148, n° 3-4, p. 267-281.
- Remon, E., Bouchardon, J.L., Cornier, B., Guy, B., Leclerc, J.C., Faure, O. 2005. « Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: Implications in risk assessment and site restoration ». *Environmental Pollution*, vol. 137, p.316-323.
- Rikers, R.A.; Rem, P., Dalmijn W. L., A. Honders. 1998 a. « Characterization of Heavy Metals in Soil by High Gradient Magnetic Separation ». *Soil and Sediment Contamination*, Vol. 7 (2), p. 163-190.
- Rikers, R.A.; Rem, P., Dalmijn W. L. 1998 b. « Improved method of prediction of Heavy Metal recoveries from soil using high magnetic process (HIMS) ». *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 54, p. 165-182.
- Rossiter, David. 2007. « Classification of Urban and Industrial Soils in the World Reference Base for Soil Resources ». *Journal Soils Sediments*, 7(2), p.96-100.
- Schwartz, Christophe, Florentin, Louis, Charpentier, Denis et Morel, Jean-Louis. 2000. « Le pédologue en milieux industriels et urbains : Sols d'une friche industrielle ». *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 8, n°2 p.135-148.
- Shaw Richard, Reinhardt Lindsay, and Isleib Jacob. 2005. « A field guide to describing soils in NYC ». *USDA-NRCS*, 12 pages.
- Silke, Hoke and Burghardt, Wolfgang. 2005. « Particle- sizes and metal- contents of deposits emitted from urban soils and industrial processes in the Ruhrarea ». *Symposium présenté au congrès de la science du sol*. En ligne. N°28. <http://natres.psu.ac.th/Link/SoilCongress/bdd/symp28/630-t.pdf>. Consulté le 20 février 2011.
- Sobocka, J. 2003. « Urban soils vs anthropogenic soils, their differentiation and classification ». In *Article présenté au SUITMA*. Nancy, France, p.78-85.
- Sponagel, H., Grottenthaler, W., Hartmann, K.J., Hartwich, R., Janetzko, P., Joisten, H., Kuhn, D., Sabel, K.J., Traidl, R. 2005. *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Hannover, p. 112.
- Stegemann, J.A. and Schneider, J. 1991. « Leaching potential of municipal waste incinerators bottom ash as a function of particle size distribution ». *Waste materials in construction*, vol. 48, p.135-143.
- Stone, M., Marsalek, J. 1996. « Trace metal composition and speciation in street sediment: Sault Ste. Marie, Canada ». *Water, Air, and Soil Pollution*, 87, p. 149-169.

- Sutherland, Ross. A. 2003. « Lead in grain size fractions of road-deposited sediment». *Environmental Pollution*, 121, p.229-237
- Système Canadien de Classification des Sols 1998. « SISCAN ». In le site du système Canadien de Classification des Sols. En ligne.
<http://sis.agr.gc.ca/siscan/taxa/cssc3/chpt14.html>.
 Consulté le 15 avril 2011.
- Tarzia, M., De Vivo, B., Somma, R., Ayuso, R.A., McGill, R.A.R., Parrish, R.R. 2002. «Anthropogenic vs. natural pollution: An environmental study of an industrial site under remediation (Naples, Italy) ». *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 2, p. 45-56.
- Vega, F.A., Covelo, E.F., Andrade, M.L. 2006. «Competitive sorption and desorption of heavy metals in mine soils: Influence of mine soil characteristics». *Journal of Colloid and Interface Science*, v 298, n 2, p. 582-592.
- Wagner, R.H.O., Stogran, S.W., and Plumpton, A.J. 1997. « Mineral processing technology for site remediation ». *Lakefield Research Limited*, 30 pages.
- Wang, Xue-Sang, Qin, Yong, Chen, Yong-Kang. 2006. «Heavy metals in urban roadside soils, part 1: effect of particle size fractions on heavy metal partitionning». *Environmental Geology*, 50, p.1061-1066.
- Wilhelmy Jean-François et Richard Daniel. 2002. *Caractérisation inorganique et minéralogique des sols contaminés Dessau Soprin: rapport final*. Coll. « Rapport technique du COREM ». Québec, 146 pages.

