ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

PAR
Said MOKHBI

ÉTUDE DE FAISABILITÉ ET DÉVELOPPEMENT D'UNE PROCÉDURE DE RÉCUPÉRATION ET DE RÉHABILITATION DES ABRASIFS ROUTIERS EN VUE DE LEUR RÉUTILISATION

MONTRÉAL, LE 29 FÉVRIER 2016


Said Mokhbi, 2016



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Gabriel Assaf, directeur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Kamal Al-Haddad, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

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

M. Yannic Ethier, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Claude Bruxelle, examinateur externe indépendant
Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines

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

LE 26 FÉVRIER 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

§ À la mémoire de Mehand Mokhbi, mon père et de Hacène Tazerout, mon oncle
Deux « Géants » de la connaissance et du savoir qui ont montré aux privilégiés qui ont croisé leur chemin, la voie royale vers l'intégrité et l'excellence §

Cette thèse, fruit d'application de recherches soutenues est le résultat d'un travail guidé par un professeur de grande rigueur et d'une rare compétence. M Gabriel Assaf a été un homme de tact, auprès de qui j'ai toujours trouvé écoute, conseil et amitié. C'est tout naturellement que je lui exprime ma profonde reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent au ministère des Transports du Québec (MTQ) et à la ville de Granby, les commanditaires de cette recherche. Plus particulièrement, je voudrais remercier M Joël Labrecque, de la D.T de l'Outaouais du MTQ, M Sylvain Flibotte de ville de Granby ainsi que M Yves Allard de Allard & Allard Construction pour leur collaboration sans limite lors du traitement des différentes phases de cette recherche.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont donné par leur clairvoyance une orientation empreinte de clarté et d'efficacité à ce projet de recherche.

Je tiens à remercier le personnel des laboratoires de matériaux, des enrobés et Steppe de l'École de technologie supérieure (ÉTS) et plus spécialement M Alain Desjardins, M Juan Mauricio Rios et Mme Mirela Sona pour leur contribution généreuse.

Suze Youance a été un véritable catalyseur d'inspiration et de persévérance durant ces longues années. Mes collègues à l'ÉTS, ainsi que mes anciens étudiants ont toujours été une source de motivation. Qu'ils trouvent ici mes remerciements les plus sincères.

Je souhaiterais témoigner à mes amis et parents qui n'ont cessé de m'encourager et de me soutenir, toute ma reconnaissance et mes remerciements les plus intenses.

Enfin, j'ai une pensée particulière pour Naima. Tu as su grâce à ton génie Naima, mais surtout grâce à ton courage, à ta générosité et à ton engagement, transformer les épreuves douloureuses de ces dernières années en une dynamique inaltérable, poussant chaque jour ceux qui t'entourent à s'améliorer d'avantage et à performer. Merci de nous donner tant de force et tant de bonheur.

À Anis et Samy, mes valeureux champions.

Titis, Maman, Soad, Malika, Dahbia, mes très chères, je vous dédie ma thèse.

ÉTUDE DE FAISABILITÉ ET DÉVELOPPEMENT D'UNE PROCÉDURE DE RÉCUPÉRATION ET DE RÉHABILITATION DES ABRASIFS ROUTIERS EN VUE DE LEUR RÉUTILISATION

Said MOKHBI

RÉSUMÉ

Cette thèse à caractère expérimental s'inscrit dans le contexte de la recherche, de l'identification et de la validation de solutions pratiques et économiques qui permettraient de réutiliser des millions de tonnes de matériaux granulaires d'abrasifs épandus chaque année au Québec pour assurer la sécurité des transports en période hivernale. A ce titre, il est bien entendu que ces solutions doivent se conformer à la *Politique québécoise de gestion de matières résiduelles* qui s'y applique puisqu'il s'agit de réutilisation des ressources naturelles exploitées.

Quoique cette thèse s'arrime et résume un état de l'art plutôt modeste sur ce sujet, elle a permis de mettre en évidence et de comparer, pour une première fois, certaines caractéristiques physiques et chimiques des abrasifs avant et après un cycle hivernal.

Elle a permis également d'identifier une solution valable et pratique de décontamination rendant les abrasifs récupérés, après un cycle hivernal, aptes à une réutilisation au sein de la D.T du MTQ de l'Outaouais ainsi de la ville de Granby.

Elle se penche donc, dans un premier temps, sur l'évaluation de la nature et du degré de la contamination des abrasifs et porte un jugement sur leur milieu récepteur qu'est la chaussée après un cycle hivernal. A cet effet, la caractérisation chimique des prélèvements effectués dans deux régions administratives et géologiques différentes du Québec, permet de constater et d'asseoir peut-être la similitude de la nature de leur contamination, et de justifier d'en poser au moins l'hypothèse. Et c'est là une autre contribution. En effet, il ressort de l'analyse expérimentale que l'exposition de ces abrasifs à l'environnement des chaussées les a contaminés aux hydrocarbures C_{10}-C_{50} et à certains métaux, principalement le zinc, le cuivre et le plomb. Cette étude expérimentale pionnière a également révélé que la répartition des métaux concernait toutes les fractions granulaires des résidus mais toutefois avec une prédominance marquée pour les fines < 80 µm et le fuseau 630 µm-2.5 mm. Cette thèse a finalement dégagé que les abrasifs sont également contaminés par des matières organiques, animales et végétales et des poussières, d'où encore la nécessité de les nettoyer avant réutilisation.

Elle se penche, dans un second temps sur l'évolution des propriétés intrinsèques et mécaniques des abrasifs après leur nettoyage. Le comportement des abrasifs montre une dégradation de leurs propriétés intrinsèques, due essentiellement à une transformation de leur fuseau granulométrique qui rétrécit, laquelle résulte des efforts principalement de compression entre le passage du trafic et la chaussée, notamment sous l'effet combiné du passage des roues des véhicules et de plusieurs autres paramètres tels que l'eau et le contact

avec d'autres matériaux. Il n'en demeure pas moins qu'ils conservent toutefois des propriétés mécaniques qui les classent dans la catégorie 1 des matériaux fins de la norme NQ 2560-11 /2002. La granularité des abrasifs lavés permet ainsi de les classer dans le fuseau AB-10 de la norme NQ 2560-114-VI/2002 et sont de ce fait, adaptés pour être possiblement réutilisés comme abrasifs composés de granulats concassés, pour un autre cycle hivernal. De plus, les résultats des essais effectués permettent de classer les abrasifs dans la catégorie 3 des «Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille ». Cette classification ouvre la voie à un certain nombre de possibilités de réutilisation d'autant plus qu'il ressort dans cette analyse expérimentale que leur potentiel de lixiviation est faible, laquelle avait toutefois été établi dans l'état de l'art.

Cette étude a enfin recherché, dans un troisième temps, les différentes possibilités de réutilisation des abrasifs en accord avec les lois, les normes et les règlements en vigueur au Québec.

Deux applications dans les enrobés sont à ce titre réalisées. Le premier mélange bitumineux est formulé et produit avec succès, soit un enrobé EB 10-S avec un apport atteignant 60% d'abrasifs. Le second mélange formulé et produit est un enrobé GB 20 avec un apport de 35% d'abrasifs. Quoique les deux formulations aient passé les exigences associées aux essais de compression, la seconde formulation a échoué aux exigences de la norme associée à l'orniéreur.

Il n'en demeure pas moins qu'avec des teneurs moindres, la réutilisation dans les enrobés demeure une alternative économiquement supérieure et beaucoup plus avantageuse que l'enfouissement.

Mots clés : abrasifs, recyclage, hydrocyclonnage, enfouissement, décontamination

FEASIBILITY AND DEVELOPMENT STUDY OF A RECOVERY AND REHABILITATION PROCEDURE OF ROAD ABRASIVES WITH A VIEW OF THEIR REUSING

Said MOKHBI

ABSTRACT

This experimental thesis identifies and validates a practical and economic alternative to the disposition of valuable abrasives after one winter cycle use by recycling them for another or more cycles. The quantities disposed of after each winter account to over a million tons every year in Quebec. The solution proposed complies with the *Quebec Residual Materials Management Policy*, which would herein apply to materials from natural resources.

While the thesis does summarize a rather modest state of the art on the above mentioned topic, it has for the first time highlighted and compared physical and chemical characteristics of abrasives before and after a winter cycle. It has also innovated in identifying a guide-valid and convenient solution to decontaminate recovered abrasives after one winter cycle, making them fully suitable for reuse on the provincial and municipal levels.

The thesis evaluates the abrasives nature and degree of contamination in the road environment. As such, the chemical characterization of samples taken from two different administrative and geological regions of Quebec on the provincial and municipal levels, shows a high degree of similarity. This additional finding justifies the assumption that reuse may be extended to possibly other jurisdictions. Indeed, it appears from the experimental analysis that exposure of these abrasives to the pavement environment induced contamination with C_{10}-C_{50} hydrocarbons and certain metals, primarily zinc, copper and lead. This pioneering experimental study also found that the distribution of the metals affected all granular fractions of residuals but still with a prominent prevalence for the fines <80 microns and the 630 microns and 2.5 mm fuseau.

In a second phase, this study assesses the evolution of the intrinsic and mechanical properties of the abrasives after their cleaning. The abrasives behavior shows a deterioration of their intrinsic properties, mainly due to a transformation or shrinking of their grain size distribution as a result of mainly compression stress between the traffic and the pavement, particularly under the combined effect of the vehicles wheel passage and of several other parameters such as water and the contact with other materials.

Nonetheless, they conserve their mechanical properties that put them in Category 1 of fine material for the standard NQ 2560-114 / 2002. The granularity of the washed abrasives allow them to be ranked into the grain size AB-10 of the NQ-2560-114 VI / 2002 standard and are thereby adapted to be possibly reused as compound abrasives of crushed aggregates for another winter cycle . Moreover, the results of the carried out experiments allow the ranking of the abrasives in the category 3 *"Guidelines of the management of concrete, brick, asphalt and stone.*" This classification opens up to a number of opportunities of reusing, especially

that it comes out from this experimental analysis that their leaching potential is low, which however had been established in the state of the art

In third place, this study sought finally, the different possibilities of abrasives reusing in agreement with the laws, standards and regulations in force in Quebec. To date, two applications in the coated are achieved. The first bituminous mixture is formulated and produced successfully; given a coated 10 EB-S with an input of up to 60% of abrasives. The second produced mixture is a coated GB 20 with an input of 35% of abrasives. Although both formulations have passed the standard requirements associated with the gyratory compactor, the second formulation failed the requirements of the standard associated with the rutting.

The fact remains that with lower concentrations and a better optimization of the formulations, the reusing in the coated remains a higher economically alternative and a lot more beneficial than landfilling.

Keywords: abrasives, recycling, hydrocyclone, landfill remediation

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE ET MISE EN CONTEXTE 3
1.1 Problématique 3
1.2 Objectifs 4
1.3 Description des étapes 4

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE – ÉTAT DES CONNAISSANCES 5
2.1 Matériaux utilisés en viabilité hivernale 5
2.2 Rôle et ratio d'application des abrasifs 8
2.3 Cycle de vie et performance des abrasifs 11
2.4 Évolution des propriétés intrinsèques des abrasifs 14
2.4.1 Caractérisation des propriétés intrinsèques des abrasifs neufs 14
2.4.2 Granulométrie type des abrasifs neufs 15
2.4.3 Synthèse des fuseaux granulométriques 18
2.4.4 Caractérisation des abrasifs usés 19
2.4.5 Abrasion et impact sur l'environnement 21
2.5 Contamination des chaussées et exposition des abrasifs 22
2.5.1 Pollution routière et origine des polluants 23
2.5.2 Mouvement des polluants sur la chaussée 29
2.5.3 Mécanismes d'interaction et de rétention des métaux lourds dans les solides 32
2.5.4 Critères génériques 34
2.5.5 Taux de contamination 34
2.6 Décontamination des sols et des matériaux 35
2.6.1 Le tamisage 35
2.6.2 La concentration gravimétrique 36
2.6.3 Flottation, séparation magnétique et séparation électrostatique 37
2.6.4 L'hydrocyclonneur et la séparation centrifuge 40
2.6.5 Décontamination des hydrocarbures 46
2.7 Pratique du Québec en matière de gestion des sels et des abrasifs 50
2.7.1 Politique de développement durable 50
2.7.2 Exemples de gestion municipale des abrasifs au Québec 53
2.8 Expériences de réutilisation des abrasifs 57
2.9 Synthèse 61

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE ET PROCESSUS EXPÉRIMENTAL 65
3.1 Hypothèses et limites 65
3.2 Description des phases d'expérimentation 66
3.3 Protocole d'échantillonnage 67
3.3.1 Provenance, ramassage et entreposage des échantillons 69

3.3.2 Échantillonnage des abrasifs neufs 72
3.3.3 Échantillonnage des résidus ramassés bruts 73
3.3.4 Échantillonnage des abrasifs tamisés et lavés 77
3.3.5 Identification des échantillons 80
3.3.6 Préparation et fractionnement des échantillons 82
3.4 Protocole d'essais 82
3.4.1 Identification des essais de caractérisation physique des résidus 83
3.4.2 Identification des essais d'évaluation de la contamination des résidus ... 85

CHAPITRE 4 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE 89
4.1 Évaluation de la contamination des abrasifs ramassés bruts 89
4.1.1 Caractérisation chimique des matériaux 89
4.1.2 Répartition de la contamination dans les différentes fractions granulométriques 93
4.1.3 Analyse et discussion 97
4.2 Évaluation des propriétés physiques et mécaniques des abrasifs ramassés bruts 99
4.2.1 Caractérisation physique des matériaux 99
4.2.2 Analyse et discussion 105
4.3 Évaluation de la contamination des abrasifs nettoyés 107
4.3.1 Caractérisation chimique des matériaux 107
4.3.2 Analyse et discussion 113
4.4 Évaluation des propriétés physiques des abrasifs nettoyés 115
4.4.1 Caractérisation physique des matériaux 115
4.4.2 Taux de récupération 123
4.4.3 Analyse et discussion 124
4.5 Classification et perspectives de réutilisation des abrasifs nettoyés 125
4.5.1 Hypothèses 125
4.5.2 Classification 126
4.5.3 Réutilisation comme abrasifs 128
4.6 Intégration des abrasifs dans les enrobés 130
4.6.1 Limites 130
4.6.2 Formulation selon la méthode Marshall 130
4.6.3 Formulation selon la méthode LC 132
4.6.4 Résultats et discussion 137
4.7 Synthèse 137

CHAPITRE 5 ÉVALUATION ÉCONOMIQUE ET ÉTUDE COMPARATIVE 141
5.1 Estimation des coûts de nettoyage et d'enfouissement 141
5.2 Analyse multicritère 145
5.2.1 Critères de choix de réutilisation des résidus d'abrasifs 145
5.2.2 Critères de sélection 146
5.2.3 Analyse par paires 147
5.2.4 Analyse multicritère 148

CONCLUSION 151

RECOMMANDATIONS 155

ANNEXE I SYNTHÈSE DES FUSEAUX GRANULOMÉTRIQUES.....157

ANNEXE II CRITÈRES GÉNÉRIQUES A, B, C DES SOLS.....159

ANNEXE III RÉSULTATS DES ESSAIS CHIMIQUES 1 161

ANNEXE IV RÉSULTATS DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION PHYSIQUE 1.....177

ANNEXE V RÉSULTATS DES ESSAIS CHIMIQUES 2 187

ANNEXE VI RÉSULTATS DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION PHYSIQUE 2.....213

ANNEXE VII DONNÉES DE RÈGLEMENTATION.....233

ANNEXE VIII ESSAIS D'ENROBÉS 237

ANNEXE IX ILLUSTRATIONS DES ÉTAPES DE L'ÉTUDE 239

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....247

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 2.1 Récapitulatif des traitements entrepris en entretien hivernal 8

Tableau 2.2 Ratio d'application des matériaux abrasifs dans la stratégie de contrôle aux États-Unis 9

Tableau 2.3 Compilation des masses totales de résidus de balayage de rue et de puisard 13

Tableau 2.4 Catégories des granulats fins selon leurs caractéristiques intrinsèques 14

Tableau 2.5 Catégories des granulats pour abrasifs 15

Tableau 2.6 Fuseaux granulométriques de spécification pour abrasifs 16

Tableau 2.7 Granulométrie typique des abrasifs 17

Tableau 2.8 Fuseau granulométrique requis pour les abrasifs dans l'état du Montana 17

Tableau 2.9 Analyse granulométrique des abrasifs récupérés au Colorado 21

Tableau 2.10 Teneurs en métaux traces de la gomme de pneumatique, en $\mu g.g^{-1}$ 25

Tableau 2.11 Teneurs en métaux traces des enrobés en $\mu g.g^{-1}$ 27

Tableau 2.12 Résultats de TRPH pour les fractions de matériaux abrasifs récupérés 47

Tableau 2.13 Répartition du réseau routier québécois 51

Tableau 2.14 Classement du réseau routier du MTQ 52

Tableau 2.15 Détermination du niveau de service 53

Tableau 2.16 Quantités de matériaux abrasifs consommées par cycle hivernal 55

Tableau 3.1 Protocole d'échantillonnage des abrasifs de Gatineau et de Granby 81

Tableau 3.2 Types d'essais réalisés 88

Tableau 4.1 Récapitulatif des concentrations des échantillons en zinc et en cuivre 92

Tableau 4.2 Récapitulatif des résultats granulométriques 100

Tableau 4.3 Récapitulatif des résultats de friabilité, du pourcentage d'usure et du coefficient d'écoulement 103

Tableau 4.4 Récapitulatif des résultats d'essai de colorimétrie 105

Tableau 4.5 Récapitulatif des résultats granulométriques des abrasifs de Gatineau 116

Tableau 4.6 Récapitulatif des résultats granulométriques des échantillons de Granby 117

Tableau 4.7 Récapitulatif des résultats de friabilité, du pourcentage d'usure et du coefficient d'écoulement des abrasifs de Gatineau 120

Tableau 4.8 Récapitulatif des résultats de friabilité, du pourcentage d'usure et du coefficient d'écoulement des abrasifs de Granby 121

Tableau 4.9 Récapitulatif des résultats d'essai de colorimétrie 123

Tableau 4.10 Récapitulatif des résultats d'essai de colorimétrie 123

Tableau 4.11 Caractéristiques et classification physique et chimique des abrasifs de Granby 127

Tableau 4.12 Caractéristiques et classification physique et chimique des abrasifs de Granby 128

Tableau 4.13 Proportions de granulats utilisées pour la confection des enrobés 131

Tableau 4.14 Caractéristiques des enrobés confectionnés avec 60 % d'abrasifs 132

Tableau 4.15 Combiné granulométrique d'un GB-20 contenant 35 % d'abrasifs 133

Tableau 4.16 Résultats des compactions à la PCG 135

Tableau 5.1 Quantités de matériaux mis en œuvre durant la saison 2012-2013 142

Tableau 5.2 Quantités et coûts associés aux opérations de lavage et d'enfouissement 143

Tableau 5.3 Comparaison par paires des critères d'évaluation 148

Tableau 5.4 Analyse multicritère des différents scénarios de réutilisation possible 149

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 2.1	Comparaison des fuseaux granulométriques des abrasifs requis par les différentes administrations	18
Figure 2.2	Comparaison des courbes granulométriques des résidus de balayage, des sables recyclés et des sables neufs	20
Figure 2.3	Principales sources de polluants routiers	28
Figure 2.4	Courbe d'accumulation et d'enlèvement de la pollution sur la chaussée	31
Figure 2.5	Les mécanismes de séparation par concentration gravimétrique	37
Figure 2.6	Fixation des particules à surface hydrophobe aux bulles d'air	38
Figure 2.7	Les trois comportements possibles pour une particule solide soumise à l'attraction gravitationnelle	40
Figure 2.8	Particule soumise à la gravité et à la force centrifuge	41
Figure 2.9	Principe de fonctionnement d'un hydrocycloneur.	43
Figure 2.10	Diagramme des résultats de TRPH pour les fractions de matériaux abrasifs récupérés	47
Figure 2.11	Plan du test des chambres expérimentales	48
Figure 2.12	Concentrations en TRPH	49
Figure 2.13	Variations des précipitations de neige dans la ville de Granby par cycle hivernal et moyenne des précipitations.	54
Figure 2.14	Quantités d'abrasifs épandues par cycle hivernal	55
Figure 2.15	Processus de prise de décision pour les options de recyclage des résidus de balayage	59
Figure 2.16	Enlèvement des gros granulats et des particules fines	60
Figure 3.1	Entreposage d'abrasifs neufs à Gatineau	69
Figure 3.2	Entreposage des résidus de balai à Gatineau	70

Figure 3.3 Prélèvement des échantillons de résidus non lavés sur le Site de Bromont....71

Figure 3.4 Centre d'entreposage des résidus de balayage au garage municipal de Granby....72

Figure 3.5 Prélèvement des échantillons de résidus non lavés sur le site de Bromont....74

Figure 3.6 Plan d'échantillonnage au centre d'entreposage provisoire du garage municipal de Granby....75

Figure 3.7 Prélèvement des échantillons à différentes profondeurs au garage municipal de Granby....76

Figure 3.8 Transport des résidus vers le site de lavage à partir du garage municipal de Granby....77

Figure 3.9 Lavage et tamisage des abrasifs au site de Bromont....79

Figure 3.10 Abrasifs tamisés et lavés au site de Bromont....80

Figure 4.1 Diagramme des concentrations en hydrocarbures (C_{10}-C_{50}) des résidus de balayage....90

Figure 4.2 Concentrations en métaux (Zn, Cu) des échantillons de Gatineau....92

Figure 4.3 Concentrations en cuivre (Cu) des séries d'échantillons GTA, GTN et GTB....94

Figure 4.4 Concentrations en zinc (Zn) des séries d'échantillons GTA, GTN et GTB....95

Figure 4.5 Répartition globale de la contamination des fractions granulaires en cuivre....96

Figure 4.6 Répartition globale de la contamination des fractions granulaires en zinc....96

Figure 4.7 Courbes granulométriques des échantillons GTA et GTN....101

Figure 4.8 Courbes granulométriques des échantillons GTB....102

Figure 4.9 Résultats de l'essai d'écoulement des échantillons GTN, GTA et GTB....103

Figure 4.10 Courbes des résultats de friabilité des échantillons GTN, GTA et GTB 104

Figure 4.11 Courbes des résultats de Micro-Deval des échantillons GTN, GTA et GTB 104

Figure 4.12 Diagramme des concentrations en hydrocarbures C_{10}-C_{50} des résidus de Gatineau....108

Figure 4.13 Diagramme des concentrations en hydrocarbures C_{10}-C_{50} des résidus de Granby 109

Figure 4.14 Concentrations en métaux lourds (Zn, Cu, Ni, Ba, Pb, Mn) des résidus bruts et lavés de Gatineau....111

Figure 4.15 Concentrations en métaux lourds (Zn, Cu, Ni, Ba, Pb, Mn) des résidus bruts et lavés de Granby 112

Figure 4.16 Courbes granulométriques des échantillons de Gatineau 118

Figure 4.17 Courbes granulométriques des échantillons de Granby....118

Figure 4.18 Coefficient d'écoulement des échantillons de Gatineau....119

Figure 4.19 Résultats de l'essai d'écoulement des échantillons de Granby....120

Figure 4.20 Valeurs de Micro-Deval des abrasifs de Gatineau....121

Figure 4.21 Valeurs de friabilité des abrasifs de Gatineau....122

Figure 4.22 Courbes des résultats de Micro-Deval 122

Figure 4.23 Proportions des abrasifs récupérés après lavage....124

Figure 4.24 Intégration de la courbe granulométrique des abrasifs lavés de Granby dans le fuseau AB 10....129

Figure 4.25 Intégration de la courbe granulométrique des abrasifs lavés de Gatineau dans le fuseau AB 10 129

Figure 4.26 Introduction du cylindre de moulage de GB-20 dans la PCG 135

Figure 4.27 Orniéreur, laboratoire des enrobés à l'ÉTS....136

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AIPCR	Association mondiale de la route
BPC	Biphényles polychlorés
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
CSA	Association canadienne de normalisation
CEAEQ	Centre d'expertise en analyses environnementales du Québec
DJMA	Débit journalier moyen annuel
DJMH	Débit journalier moyen en période hivernale
ÉC	Conductivité électrique
ÉTS	École de technologie supérieure
ÉTM	Éléments traces métalliques
FCM	Fédération canadienne des municipalités
GRD	Échantillons du garage municipal de Granby
GTA	Échantillons provenant des autoroutes 5 et 50
GTB	Échantillons provenant des routes 307 et 105
GTD	Échantillons de la ville de Bromont
GTL	Échantillons de la ville de Gatineau
GRN	Échantillons de la ville de Granby
GTN	Abrasifs neufs
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HCx	Hydrocarbures pétroliers

LDRGBBAP	Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique et d'asphalte issus des travaux de construction et de démolition et des résidus du secteur de la pierre de taille
MD	Micro Deval
MDDEFP	Ministère du développement durable, de l'environnement, de la faune et des parcs
MDDELCC	Ministère du développement durable, de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques
MTO	Ministère des transports de l'Ontario
MTQ	Ministère des transports du Québec
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PCG	Presse à cisaillement giratoire
PPSRTC	Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés
RSCTSC	Règlementation sur le stockage et les centres de transferts des sols contaminés
SAR	Taux d'absorption de sodium
SETRA	Service d'étude sur les transports, les routes et leurs aménagements
STEPPE	Station expérimentale des procédés pilotes en environnement de l'ÉTS
TPH	Total Petroleum Hydrocarbons
TRPH	Total Petroleum Hydrocarbons
WTC	Wisconsin Transportation Center

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Alphabet grec minuscule

μ	Viscosité du fluide
ω	Vitesse de rotation
ρ	Masse volumique du fluide
ρ_p, ρ_s	Masse volumique de la particule
ρ_H	Masse volumique de la phase solide lourde
ρ_L	Masse volumique de la phase solide légère
ρ_M	Masse volumique du liquide

Alphabet romain minuscule

a, b, c, d	Constantes empiriques
d_{mm}	Densité maximale
d_{gb}	Densité brute du granulat combiné
d_p	Diamètre de la particule
d_{ge}	Densité effective du granulat
d_{50}	Maille de coupure
g	Gravité
k_1, k_2	Constantes
n	Constantes
r	Distance du centre de rotation au centre de gravité de la particule
t	Temps écoulé, temps cumulé

Alphabet romain majuscule

A, B, C	Échantillons

Cd	Cadmium
C	Chrome
Cu	Cuivre
$C_{19} – C_{41}$	acides n-alcanoïques
D_c	Diamètre de l'hydrocycloneur
EB-10C, S	Nomenclature d'enrobés
F_c	Force centrifuge
F_g	Poids ou encore la force de gravité
G	Coefficient de centrifugation
K	Constante tenant compte de la géométrie de l'hydrocycloneur
K_{sp}	Constante de solubilité
L	Anions ou ligands
M_0	Masse initiale disponible sur la chaussée
M_1	Masse
M_2	Masse
Me	Masse entrainée pendant le temps t
M(t)	Masse déposée au temps (t)
ML_n	Phase solide des ions
$M_r(t)$	Masse disponible à la surface au cours du temps t
M_{max}	Valeur maximale
M^{n+}	Cations
M_p	Masse de la particule
N	Stabilité

Ni	Nickel
Pb	Plomb
P_{ba}	Pourcentage de bitume absorbé, %
P_{bi}	Teneur en bitume initiale, %
P_e	Pourcentage d'eau absorbé par le granulat, %
PM_{10}	Particules de moins de 10 Microns de diamètre
Q	Débit d'alimentation
R	Hauteur d'eau précipitée sur le temps t
T	Temps écoulé
Zn	Zinc

INTRODUCTION

L'épandage de matériaux abrasifs en viabilité hivernale est quasi systématique au Québec. Au printemps, les résidus sont balayés mécaniquement et transportés le plus souvent dans des sites d'entreposage et d'enfouissement. Dans le meilleur des cas, ils sont utilisés comme matériaux de recouvrement journalier car assimilés à des matières résiduelles ou dans bien des cas, à des matières dangereuses; ce qui limite considérablement leur valorisation. Leur stockage dans des centres d'enfouissement est lourd de conséquences sur les plans environnemental et économique.

L'enjeu d'une réutilisation potentielle des matériaux abrasifs est considérable en ce sens que cela réduirait la production de nouveaux agrégats et préserverait ainsi les ressources naturelles non renouvelables que sont les roches brutes. La réutilisation réduirait également les espaces d'enfouissement actuellement en voie d'être saturés mais également les coûts qui leur sont directement ou indirectement associés. Enfin, l'enjeu environnemental serait de réduire la production et l'utilisation des sels de voirie en favorisant l'usage des abrasifs.

Cette thèse décrira le cycle de vie des abrasifs, les mécanismes par lesquels les matériaux se trouvent contaminés après une exposition durant un épisode hivernal, les différents contaminants, leur comportement physique ainsi que leurs propriétés intrinsèques et mécaniques après avoir subi un lavage. Elle abordera enfin les approches qui permettent une réutilisation et une réhabilitation des abrasifs.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET MISE EN CONTEXTE

1.1 Problématique

L'épandage en hiver des matériaux abrasifs de type pierre concassée, de granulométrie 0/5 mm, pour le déglaçage routier, est largement répandu au Québec. Au printemps, quand la fonte des neiges est terminée, les matériaux abrasifs sont balayés mécaniquement et transportés dans des sites d'entreposage et d'enfouissement. Leur récupération, pour une réutilisation quelconque, est très limitée.

Les matériaux recueillis, après balayage mécanique des routes, ont une composition hétérogène et le peu de connaissances des propriétés mécaniques ou chimiques limite la possibilité de leur réutilisation sans une caractérisation.

Les matériaux abrasifs entrainent une sédimentation dans les cours d'eau au voisinage des chaussées, des obstructions de ponceaux et de conduites d'égouts et une contamination de l'environnement par des agents chimiques, des hydrocarbures, des métaux et des composés organiques qu'ils peuvent transporter. L'entretien printanier des routes par le balayage permet d'atténuer ces impacts. Toutefois, leur stockage dans des zones d'enfouissement est lourd de conséquences sur le plan environnemental. La vérification du potentiel de leur réutilisation s'impose.

Un programme d'échantillonnage représentatif et d'analyse mécanique et chimique est nécessaire pour pouvoir déterminer les propriétés de ces matériaux abrasifs récupérés et évaluer leur potentiel pour une réutilisation subséquente.

Cette orientation cadre avec l'optique de développement durable dans lequel le Québec s'est inscrit. En effet, les enjeux en matière de développement durable, amènent à s'interroger sur les méthodes actuelles de gestion des abrasifs et de tenter, par l'élaboration de cette présente thèse, de les faire évoluer dans le sens stratégique du développement durable. Cette recherche

vise donc à élaborer les modalités de la mise en œuvre pratique d'un cadre de gestion, de récupération, de décontamination et de réutilisation des abrasifs.

1.2 Objectifs

L'objectif principal de cette thèse est d'évaluer la possibilité de réutiliser les matériaux abrasifs contaminés. Les deux principaux axes à satisfaire pour atteindre cet objectif, sont les suivants :

- la solution doit être pratique et faisable en vraie grandeur;
- la solution doit être rentable et d'un coût minime.

1.3 Description des étapes

Pour atteindre ces objectifs, cette thèse suit les étapes suivantes :

- caractérisation des abrasifs récupérés par balayage mécanique par la réalisation d'un échantillonnage représentatif ainsi que des essais physico-chimiques en laboratoire sur différentes fractions granulométriques;
- évaluation de la répartition contamination/granulométrie;
- description exhaustive des changements physiques et mécaniques subits par les abrasifs après une exposition à un cycle hivernal;
- élaboration d'une méthode de décontamination de ces matériaux afin d'optimiser leur performance en vue d'une réutilisation. Une série d'analyses en laboratoire sera entreprise avant et après le procédé;
- élaboration d'une application par l'intégration des abrasifs dans une formulation d'enrobés comme substitution de la classe 0/5 mm;
- évaluation de la rentabilité de réutilisation des abrasifs dans une perspective de développement durable.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE – ÉTAT DES CONNAISSANCES

De nombreuses recherches ont traité le thème de la viabilité hivernale et les moyens d'amélioration des conditions de conduite en hiver. Elles concernent en particulier les sels de déglaçage pour leur rôle de fondants routiers et leur impact sur l'environnement. Cependant, peu de recherches ont été initiées sur les abrasifs tels quels. Les rares travaux réalisés sur ces matériaux relèvent plutôt d'initiatives de certaines municipalités ou d'administrations, lesquelles ont été confrontées à la gestion de la pierre récupérée après balayage.

Ce chapitre décrit en premier, les principaux matériaux utilisés de par le monde en viabilité hivernale, les conditions de leur utilisation, leur efficacité éprouvée et les conséquences que leur utilisation engendre. Il s'intéresse ensuite à la contamination des chaussées, milieu récepteur des abrasifs, au mouvement des contaminants ainsi que des différents modes de décontamination des sols pollués.

Il présente également une synthèse des connaissances et des travaux réalisés sur les granulats abrasifs. Il s'intéresse principalement au cycle de vie et aux propriétés des granulats abrasifs, à leur rôle ainsi qu'à leur performance. Ce chapitre traduit l'état des recherches sur les transformations que les pierres abrasives subissent pendant leur exposition à un cycle hivernal, à leur mode de contamination et à l'évolution de leurs propriétés intrinsèques. Il présente enfin les résultats des démarches de certaines administrations visant à décontaminer et à valoriser les abrasifs.

2.1 Matériaux utilisés en viabilité hivernale

En saison hivernale, les conditions de déplacement, très difficiles, amènent les gestionnaires des infrastructures routières à user de différents moyens pour maintenir la sécurité de la

circulation des personnes, des biens et des marchandises et ce, dans le but d'assurer la pérennité des activités économiques et sociales (AIPCR, 2010). Les pays touchés par la neige et le verglas ont souvent recours à des mesures d'entretien des chaussées, en utilisant des sels secs ou humidifiés, des saumures ou bien encore des abrasifs, des sables ou des mélanges de sables et de sels (AIPCR, 2010).

Aux États-Unis, la stratégie de contrôle de la neige et de la glace en entretien hivernal comporte différentes interventions pouvant être classées en quatre grandes catégories : l'antigivrage, le dégivrage, l'enlèvement mécanique de la neige et de la glace avec amélioration de la friction ou encore l'enlèvement mécanique seul (Blackburn et al., 2004b).

C'est ainsi que l'antigivrage, considéré comme une intervention préventive, et le dégivrage consistent à contrôler la formation de glace sur la surface de la chaussée par l'application, au moment opportun, d'un agent chimique pouvant amener la température de la neige et de la glace au-dessus du point de congélation. L'agent chimique est particulièrement efficace à une température supérieure à -6^{o} C, en dessous de laquelle, son efficacité diminue (WTC, 2005).

À titre d'exemple, le bulletin n^{o} 06 du Wisconsin Transportation Center explique que l'effet du sel est directement lié à la température. Il est précisé que le sel peut faire fondre cinq fois plus de glace à -1^{o} C qu'à -6^{o} C. À cette dernière température, le sel met beaucoup plus de temps à faire fondre la glace. Une heure de temps est pratiquement nécessaire pour faire fondre 4 cm d'épaisseur à –6^{o} C (WTC, 2005).

L'effet des sels change donc considérablement selon l'écart de température. En dessous de –10^{o} C, la quantité de sel nécessaire pour le déglaçage devient trop importante. Le temps requis pour que le phénomène se produise devient alors trop long (Blackburn et al., 2004b).

Dans un autre registre, les sels, étant très solubles dans l'eau, s'acheminent par ruissellement vers les accotements et les cours d'eau et s'infiltrent dans le sol pour rejoindre les eaux souterraines, provoquant ainsi une augmentation de la concentration en sel de

l'environnement proche de la route. Ces sels contaminent les eaux potables et mettent ainsi en péril la faune et la flore (WTC, 2005).

Ce déglaçage chimique accélère la détérioration de la chaussée en général. Les routes en béton et les ponts sont encore plus vulnérables car le béton et l'acier de structure sont plus sensibles aux effets du sel. On cite également l'accélération de la corrosion des véhicules comme conséquence directe du déglaçage par les sels. Cela induit des coûts considérables (WTC, 2005).

Toutes ces contraintes expliquent les préoccupations des gestionnaires et leur volonté de recourir à d'autres techniques alternatives. L'une des plus courantes est l'application directe de matériaux abrasifs.

Pour améliorer les conditions de circulation hivernales, les abrasifs sont utilisés quand les températures sont trop basses et que les sels ne sont plus efficaces (Blackburn et al., 2004a). La technique la plus courante pour l'amélioration de la friction sur une surface de neige ou de glace est l'application de matériaux abrasifs tels que le sable, les cendres ou les résidus de la pierre concassée. Ils peuvent être appliqués directement ou bien avec un ajout de quantités variables mais contrôlées, de produits chimiques déglaçants (Blackburn et al., 2004a).

Le recours aux abrasifs est systématique en Amérique du Nord. Le ministère des Transports de l'Ontario souligne que lors des jours de grand froid, en dessous de -12°C, les matériaux abrasifs tels que les sables ou les petites pierres sont utilisés pour améliorer le frottement sur les surfaces glissantes (MTO, 2005). L'usage d'abrasifs devient donc nécessaire quand le besoin en frottement est recherché, particulièrement au niveau des courbes, des plans inclinés, des ponts, des intersections et sur les routes recouvertes de neige durcie (MTO, 2005).

Au Québec, selon la température et l'effet recherché, les matériaux utilisés sont déterminants pour la réussite de l'opération d'entretien. L'état de la chaussée dépend du traitement qu'elle

reçoit en fonction des facteurs climatiques. Le Tableau 2.1 présente les principaux matériaux utilisés en viabilité hivernale et leurs propriétés.

Tableau 2.1 Récapitulatif des traitements entrepris en entretien hivernal
Tiré du site Web http://www.mtq.gouv.qc.ca (consulté le 12 novembre 2012)

	Fondants (sels)		**Abrasifs**
Matériaux	Chlorure de Sodium	Chlorure de calcium	Sable, gravier, pierre
Propriétés	Favorise la fonte de la neige et de la glace qui reste après le déneigement	Fondant plus efficace à basse température que le chlorure de sodium	Rendent la chaussée rugueuse et permettent d'augmenter l'adhérence des pneus
Utilisation	Fondant le plus utilisé. Meilleure efficacité à des températures supérieures à - 10^{o} C	Est ajouté en faibles quantités au sel et aux abrasifs. Augmente l'efficacité du sel lorsque la température est inférieure à - 15^{o}C	Sont utilisés seuls ou combinés avec de faibles quantités de fondants. conviennent à tous les types de chaussées lorsque la température est inférieure à - 15^{o}C

2.2 Rôle et ratio d'application des abrasifs

Selon Nixon (2001), l'utilisation d'abrasifs en entretien hivernal est une pratique bien établie. Le sable ou tout autre abrasif aide à l'augmentation de l'adhérence entre les véhicules et la chaussée recouverte de neige ou de glace (Nixon, 2001). Dans plusieurs administrations américaines, l'usage de sables et de matériaux abrasifs est un standard de l'entretien hivernal, bien que certaines études attestent que leur apport en friction est minime (Nixon, 2001).

Blackburn et al (2004a) expliquent que les matériaux abrasifs sont vitaux dans le programme de contrôle de la neige et de la glace. Ils représentent un soutien incontournable pendant une période de grand froid ou en présence d'une épaisse couche de glace car les sels et les autres produits chimiques ne produisent pas l'effet attendu dans ces conditions. Les abrasifs sont également très efficaces sur les routes non revêtue (Blackburn et al., 2004a).

Selon le National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), la fonction principale des matériaux abrasifs utilisés pour le déglaçage en hiver est de fournir temporairement une amélioration du frottement sur une surface de glace ou de neige (Blackburn et al., 2004b) .

Le taux d'application de ce type de matériaux varie selon les administrations mais globalement, il se situe entre 225 kg/km et 420 kg/km (Blackburn et al., 2004b). Aux États-Unis, les matériaux abrasifs sont épandus sur la surface de la chaussée à raison de 338 kg/voie/km. Ils sont destinés à augmenter la friction entre les véhicules et la chaussée, recouverte de neige ou de glace. Ils peuvent être utilisés secs ou pré mouillés avec de la saumure liquide ou encore mélangés à des sels (Nixon, 2001).

Ces chiffres interpellent sur la quantité importante de matériaux abrasifs, utilisée chaque année, pour assurer la viabilité hivernale dans les pays concernés par la neige et la glace. Le NCHRP a proposé à cet effet, une stratégie de contrôle des ratios d'application des abrasifs. Le Tableau 2.2 montre les taux d'application en vigueur aux États-Unis. Il s'agit de quantités de matériaux qui sont épandues chaque année (Blackburn et al., 2004b).

Tableau 2.2 Ratio d'application des matériaux abrasifs dans la stratégie de contrôle aux États-Unis
Tiré de NCHRP (2007, p. 12)

Strategy/ Method	**Materials**	**Pavement Temperature Ranges 1**	**Application Rates**
Abrasives	Pre-wet Abrasives, Dry Abrasives	No limits	225 – 2 700 Kg /Lane /Km (500-6 000 Lbs / Lane/ Mile)
	Abrasive/Salt Mixes	0° C to -18° C (32° F to 0° F)	225 – 2 700 Kg /Lane /Km (500-6 000 Lbs / Lane/ Mile)

En Norvège, une méthode d'optimisation de l'action de déglaçage des matériaux a été développée. Elle est jugée plus efficace et plus écologique car elle ne nécessite pas un ajout

de sel. Elle permet de réduire considérablement la pollution de l'environnement par les sels, très nocifs (Vaa, 2004). Ainsi, les autorités norvégiennes ont lancé le défi de trouver le moyen d'optimiser l'action des matériaux abrasifs en entretien hivernal. Un procédé de chauffer le sable sec et le sable mouillé a été testé et mis au point. C'est une technique qui s'est avérée très prometteuse et la réussite de ce procédé fait qu'en Norvège, de grandes quantités de sable sont ainsi utilisées pour l'amélioration de l'adhérence des routes en entretien hivernal. Quelque 8,5 tonnes/km de matériaux abrasifs sont épandues chaque année (Vaa, 2004).

En France, les abrasifs sont utilisés pour améliorer le niveau d'adhérence des chaussées verglacées ou enneigées à faibles niveaux de service. Les administrations ont également recours aux abrasifs quand l'utilisation des fondants routiers dans une zone déterminée, est limitée (Derombise, 2012). Le taux d'épandage est en moyenne de 300 g/m^2.

Au Canada, les abrasifs sont utilisés sur les autoroutes, sur les routes de grande communication et sur les routes de liaison quand les températures de la surface de la chaussée sont inférieures à -10 ^{0}C. Sur les routes locales, leur usage est exceptionnel (AIPCR, 2010). La ville d'Edmonton utilise environ 165 000 tonnes de sables pour le déglaçage des rues chaque hiver (City of Edmonton, 2005).

Le Québec utilise quant à lui, des centaines de milliers de tonnes d'abrasifs chaque année en entretien hivernal. Le taux d'application peut varier entre 350 kg/km et 700 kg/km selon les conditions (DLC, 1997). Ce taux représente les quantités moyennes épandues par cycle d'épandage. La province a épandu durant la période 2008–2009, 873 695 tonnes d'abrasifs pour assurer la viabilité hivernale du réseau du (MTQ, 2010b). En 2012-2013, 994 302 tonnes de sable et de petites pierres ont été utilisées sur le réseau du MTQ qui compte 30 000 km (MTQ, 2014). Cela représente un taux d'épandage de quelques 30 tonnes/km/saison. La ville de Granby a épandu 4 000 tonnes sur un réseau de 500 km en 2012 (Ville de Granby, 2012a). Le taux d'épandage est de 8 tonnes/km/saison. Cette différence de taux est due aux niveaux de services pratiqués par les administrations.

Les quantités exactes épandues dans toute la province ne sont pas publiées. Un calcul approximatif permet toutefois d'estimer ces quantités. Sur 100 000 km de routes municipales que compte la province, avec un taux d'application de 8 tonnes, on avoisine 1 800 000 tonnes d'abrasifs épandues chaque année au Québec.

2.3 Cycle de vie et performance des abrasifs

À la fin de l'hiver, les abrasifs épandus sont récupérés par balayage mécanique par la majorité des administrations routières. Les résidus représentent un danger pour la sécurité des usagers de la route s'ils demeuraient en place durant l'été et l'automne. Le balayage devient alors une nécessité. En outre, la contamination qu'ils génèrent à l'environnement rend le balayage urgent dans bien des cas (MECA, 2009).

Le balayage pose toutefois des contraintes, notamment lorsqu'il est précédé d'un lavage de rue. Une recherche du MECA impliquant la collaboration de plusieurs municipalités et partenaires aux États-Unis, a permis de créer une banque de données avec des informations sur :

- la quantité totale d'abrasifs utilisée en entretien hivernal durant l'hiver 2007-2008;
- le programme de balayage des rues;
- l'estimation des quantités de sable récupérées durant la saison 2007-2008.

Les quantités estimées de sable récupérées pendant cette saison donnent les résultats suivants :

- 84 028 tonnes de sable épandues sur les routes du Lake Superior Basin lors de la saison d'hiver;
- 21 299 tonnes (25%) ont été récupérées par balayage. Ce chiffre n'inclut pas les récupérations dans les fossés ou dans le bassin versant.

Il en ressort que 62 730 tonnes de sable (75%) ont été répandues par lavage de rue dans le bassin versant et les cours d'eau (MECA, 2009). Les résultats partiels de ce projet mettent en évidence les pertes en abrasifs qu'engendrent les pratiques courantes de lavage de rue. L'amélioration du balayage devient ainsi pertinent pour une récupération significative des abrasifs (MECA, 2009).

Le Minnesota Pollution Control Agency recommande quant à lui, le balayage des rues deux fois par an pour prévenir la pollution. Une première fois au printemps, une seconde fois en automne (Mokwa et Foster, 2013). Le même constat est établi par le Centre pour la Protection des bassins versants qui considère le balayage du printemps comme un moyen de prévention de la pollution générée par le sable et la dégradation des gravillons (CWP, 2009).

Cependant, deux principaux problèmes sont associés au balayage et à l'élimination des résidus de balayage : l'espace, que ces résidus occupent, se raréfie et le coût encouru par l'enfouissement n'est pas négligeable. Il est de l'ordre de 6$ à 11$ la tonne (Mokwa et Foster, 2013). L'opération de balayage du printemps, à titre d'entretien printanier, génère une très grande quantité de matières, a priori contaminées, qui sont entreposées ou enfouies dans des sites aménagés. Plusieurs villes en Amérique du Nord entreprennent des actions pour tenter de remédier à cette situation.

Au Canada, seuls quelques projets pilotes s'inscrivent dans cette perspective. Ils ont été initiés par le MTQ et par certaines villes à l'image d'Edmonton, de Granby et de Sherbrooke. La ville d'Edmonton utilise, pour les besoins d'entretien hivernal d'un réseau de 15 000 km, quelques 165 000 tonnes de sables chaque année. Approximativement, 115 000 tonnes (70%) de ces abrasifs, sont récupérées par balayage de printemps chaque année (City of Edmonton, 2005). Dans le passé, seuls 25% de ces résidus de balayage étaient réutilisés dans des mélanges avec d'autres sables. La majorité de ces matériaux étaient mis à la décharge en raison de leur taux d'absorption de sodium (SAR) dépassant les limites des lignes directrices en vigueur. Des quantités importantes ont ainsi été enfouies, réduisant au fil des ans, considérablement les espaces d'enfouissement (City of Edmonton, 2005).

Un projet pilote de programme de revalorisation des abrasifs a permis dès 2005, de réutiliser 92 000 tonnes de matériaux (80%) par an des 115 000 tonnes de résidus récupérées annuellement pour l'entretien hivernal des routes. 2 300 tonnes, soit (2%), représentant le gros granulat, sont réutilisées comme agrégats recyclés. 101 000 tonnes, soit (88%) ont été revalorisées et réutilisées après nettoyage (City of Edmonton, 2005).

Le programme de recyclage mis en place à Edmonton comporte quatre phases : l'élimination des déchets (une partie est effectivement éliminée), le lavage des matériaux, le traitement des fines et le séchage des matériaux décontaminés. Ce programme est détaillé dans le sous Paragraphe 2.8.1.

Au Québec, la Ville de Sherbrooke, sous l'égide du MDDEP, a entrepris en 2008, un projet pilote d'évaluation du potentiel de valorisation des abrasifs, récupérés durant le balayage de printemps. Il s'avère qu'une importante quantité d'abrasifs est récupérée durant ce balayage (Ville de Sherbrooke, 2011). Les quantités de trois années de balayage sont illustrées dans le Tableau 2.3

Tableau 2.3 Compilation des masses totales de résidus de balayage de rue et de puisard
Tiré de Ville de Sherbrooke (2011, p. 2)

Hiver	**Réserve annuelle d'abrasifs (t.m)**	**Résidus de balayage récupérés (t.m)**	**Résidus de puisard récupérés (t.m)**
2007/2008	11 000	4 459	-
2008/2009	11 000	4 836	1 473
2009/2010	11 000	5 003	1 022

Selon la ville de Sherbrooke, il a été possible de récupérer 6 026 tonnes en 2010. Plus de 73% ont été valorisés de la manière suivante: Les résidus grossiers issus du balayage et les résidus de puisard ont été disposés comme matériaux de recouvrement journalier dans un site d'enfouissement technique. Les particules fines issues du balayage et du tamisage ont été rejetées dans les bassins de sédimentation d'une sablière. Ces matières ont été, par la suite,

acheminées vers des sites autorisés, conformément à la règlementation sur le stockage et les centres de transferts des sols contaminés (RSCTSC) (Ville de Sherbrooke, 2011).

2.4 Évolution des propriétés intrinsèques des abrasifs

2.4.1 Caractérisation des propriétés intrinsèques des abrasifs neufs

Au Québec, les normes règlementant les caractéristiques techniques requises pour les produits d'entretien hivernal s'inspirent des normes en vigueur en Amérique du Nord (AIPCR, 2010). Il s'agit notamment de la norme NQ 2560-114-I/2002 qui définit les abrasifs comme « des granulats composés de particules ou fragments, concassés ou non, de roc, de pierre, de gravier, de sable ou de certains sous-produits industriels utilisés en viabilité hivernale » (BNQ, 2002).

Les caractéristiques intrinsèques des abrasifs doivent répondre à des exigences de résistance et de maniabilité. Ils doivent notamment correspondre aux catégories 1, 2, 3 de la norme NQ 2560-114-I/2002. Ces trois catégories sont représentées dans le Tableau 2.4

Tableau 2.4 Catégories des granulats fins selon leurs caractéristiques intrinsèques
Tiré de BNQ (2002, p. 13)

Caractéristique intrinsèque	**Méthodes d'essai**	**Catégories de granulats fins**		
		1	**2**	**3**
Micro-Deval (MD), %	LC 21 – 101	≤30	≤35	≤35
Friabilité, %	LC 21- 080	≤40	≤40	s.o

De plus, pour des besoins de maniabilité, les abrasifs doivent répondre à une exigence complémentaire selon la norme NQ 2560-114-I/2002. Il s'agit de leur teneur en eau. En effet, la norme définit un seuil maximal pour la teneur en eau des abrasifs. Elle doit être inférieure à 5%, selon la méthode d'essai LC 21-201. Le Tableau 2.5 résume les exigences de cette norme.

Tableau 2.5 Catégories des granulats pour abrasifs
Tiré de BNQ (2002, p. 67)

Granulats fins	**Méthode d'essais**	**Exigence**
Caractéristiques intrinsèque [1]		Catégories 1, 2 et 3[2]
Caractéristiques complémentaires : - Teneur en eau, %	LC 21 – 201	≤5

1- selon Tableau 3.2 : Catégories de gros granulats selon leurs caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure et aux chocs

2- l'une ou l'autre des catégories 1, 2 ou 3 peut être utilisée et satisfait aux exigences de la norme NQ 2560-114-I/2002

Pour des besoins de maniabilité, la norme NQ 2560-114-I/2002 permet le traitement des abrasifs au moyen d'autres produits, notamment les sels. Elle restreint toutefois l'utilisation de ces derniers, lesquels doivent respecter les exigences des documents 121001 et 12102 du ministère des Transports du Québec (BNQ, 2002).

2.4.2 Granulométrie type des abrasifs neufs

Au Québec, le fuseau granulométrique des abrasifs est normalisé. Il doit correspondre tel que représenté dans le Tableau 2.6, à la norme NQ 2560-114-I/2002. Il y est indiqué que le fuseau granulométrique AB 5 est adapté pour les abrasifs constitués de roc concassé alors que le fuseau AB 10, est adapté pour les abrasifs composés de sables tamisés, de granulats ou de gros granulats concassés.

Il est utile cependant de souligner les exigences du MTQ relatives à la granulométrie des abrasifs. La norme 14401 exclut en effet, le fuseau AB 10M. Ceci dans le but vraisemblablement, de limiter la fraction des fines tolérée dans ce dernier fuseau, laquelle peut atteindre 15% de passant au tamis 80 µm.

Tableau 2.6 Fuseaux granulométriques de spécification pour abrasifs
Tiré de BNQ (2002, p. 67)

Tamis	**AB – 10 M** **Passant, %**	**AB – 5** **Passant, %**	**AB – 10** **Passant, %**
10 mm	100	s. o.	100
8 mm	s. o.	100	s. o.
5 mm	50 -100	85 – 99	95 – 100
2,5 mm	0 – 40	1 – 15	s. o.
1,25 mm	0 – 10	0 – 5	0 – 70
630 µm	s. o.	s. o.	0 – 50
315 µm	s. o.	s. o.	0 – 35
160 µm	s. o.	s. o.	0 – 15
80 µm	0 – 15	s. o.	0 – 5

NOTE – La mention s. o. signifie qu'il n'y a pas d'exigences pour le tamis concerné.

Pour sa part, Le NCHRP donne les caractéristiques granulométriques types des abrasifs. Le Tableau 2.7 indique les granulométries requises en Colombie Britannique et en Oregon (NCHRP, 2007).

Tableau 2.7 Granulométrie typique des abrasifs
Adapté de NCHRP (2007)

Sieve Size	British Columbia Ministry of Transportation and Highways			Oregon Department of Transportation
	Designated 12.5 mm % passing	Designated 16 mm % passing	Designated 19 mm % passing	Designated 6.75 mm (.25 in) % passing
19.000 mm (3/4")	-		100	-
16.000 mm (5/8")	-	100		-
12.500 mm (1/2")	100	-		-
9.500 mm (3/8")	-	80 – 100	80 – 100	100
6.750 mm (1/4")	-	-	-	80 – 100
4.750 mm	50 – 95	50 – 95	50 – 95	-
2.360 mm	30 – 80	30 – 80	30 – 80	-
1.500 mm	-	-	-	8 – 22
0.600 mm	10 – 50	10 – 50	10 – 50	-
0.375 mm	-	-	-	0 – 10
0.300 mm	0 – 25	0 – 25	0 – 25	-
0.075 mm (#200)	0 – 6	0 – 6	0 – 6	0 – 2

Le fuseau granulométrique en vigueur dans l'état du Montana est quant à lui, représenté dans le Tableau 2.8.

Tableau 2.8 Fuseau granulométrique requis pour les abrasifs dans l'état du Montana
Adapté de Mokwa et Foster (2013, p. 5)

Dimensions métriques	Mesures américaines	Fuseau granulométrique spécifié	
Tamis et ouvertures	Tamis	min	max
7.94 mm	5/16 po		100
2 mm	No 10	20	60
425 µm	No 40	0	30
75 µm	No 200	0	10

En France, les abrasifs sont des sables, des gravillons, du maërl, ou encore des granulats concassés calibrés à 2/6 mm et à 4/10 mm. Ce sont également, des scories, des mâchefers, des laitiers, des minerais locaux tels que la pouzzolane, les déchets de carrière, etc.(Derombise, 2012).

2.4.3 Synthèse des fuseaux granulométriques

La synthèse des fuseaux granulométriques requis par les administrations américaines et canadiennes est illustrée en Annexe I et dans la Figure 2.1.

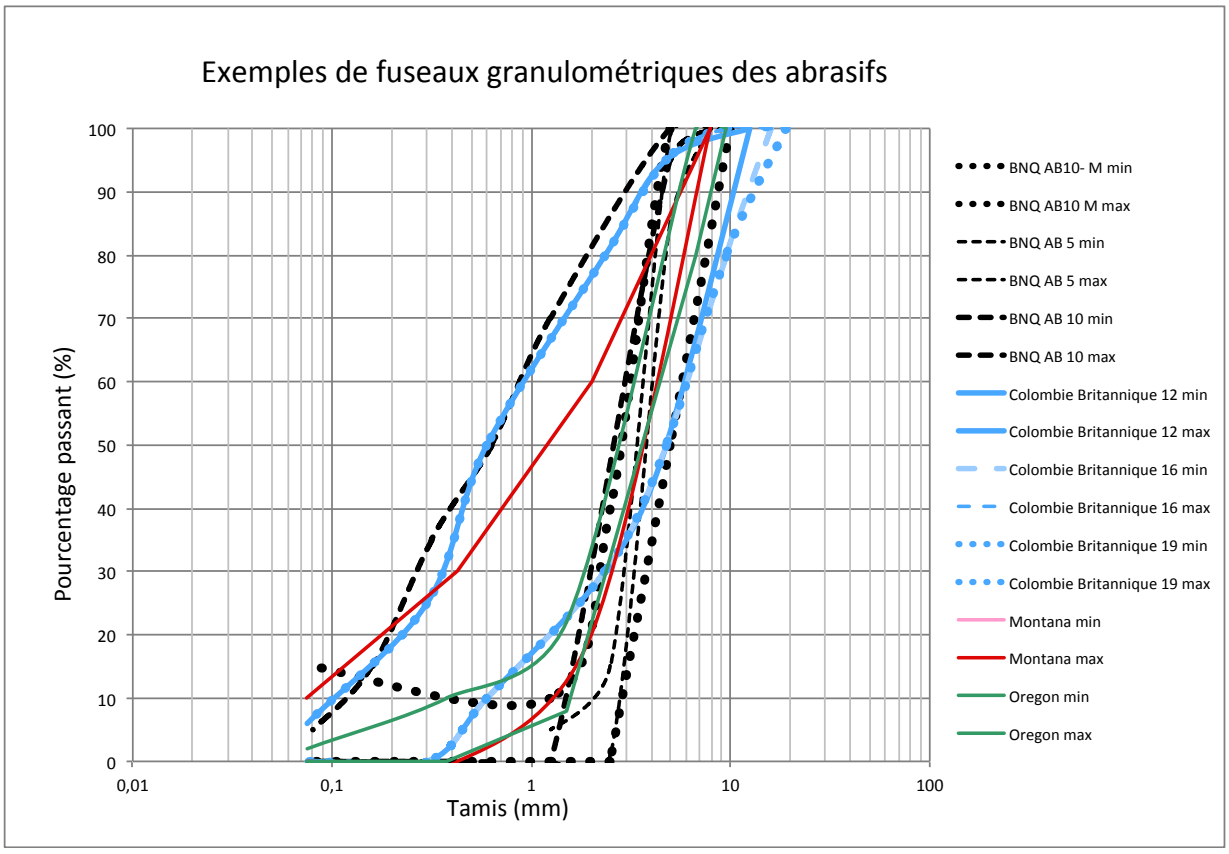


Figure 2.1 Comparaison des fuseaux granulométriques des abrasifs requis par les différentes administrations

La superposition des fuseaux granulométriques requis pour les abrasifs par différentes administrations nord-américaines montre une tolérance pour certains États quant à l'utilisation de granulats pourvus de fines < 80 µm. La majorité favorisera cependant, des fuseaux restreints, qui limitent l'intervalle requis pour les valeurs min et max. Il s'agit dans ce cas, de privilégier les produits issus du concassage de la pierre, où il est plus aisé de produire la granulométrie souhaitée.

Cette synthèse montre également une différence sensible entre certains fuseaux du Québec et du Montana comparativement à ceux des autres États du Canada et des États-Unis. En effet, si pour la plupart des administrations, une granulométrie restreinte est requise, ce n'est pas le cas du fuseau AB 10 du BNQ qui englobe un large éventail. La recherche n'a pas permis de statuer sur cet état de fait précisément. Ceci représente probablement un signe d'encouragement aux gestionnaires des réseaux routiers à utiliser beaucoup plus les abrasifs comme agents de déglaçage aux dépens des sels, sans pour cela se limiter à une granulométrie qui pourrait être contraignante à obtenir, eu égard à des aspects financiers ou pratiques.

2.4.4 Caractérisation des abrasifs usés

Certaines administrations routières ont procédé à l'analyse des propriétés physiques des abrasifs ramassés. Elle a concerné principalement l'analyse granulométrique. L'expérience de la ville d'Edmonton montre que les sables recyclés par la méthode d'hydrocyclonnage, méthode décrite dans le Paragraphe 2.6.4, ont une granulométrie qui s'insère dans le fuseau granulaire requis pour les abrasifs neufs. La courbe représentée à la Figure 2.2 se confond presque à celle du sable neuf. Néanmoins, la concentration en fines des sables recyclés est légèrement supérieure à celle des sables neufs mais reste dans les normes (Haug, 2005).

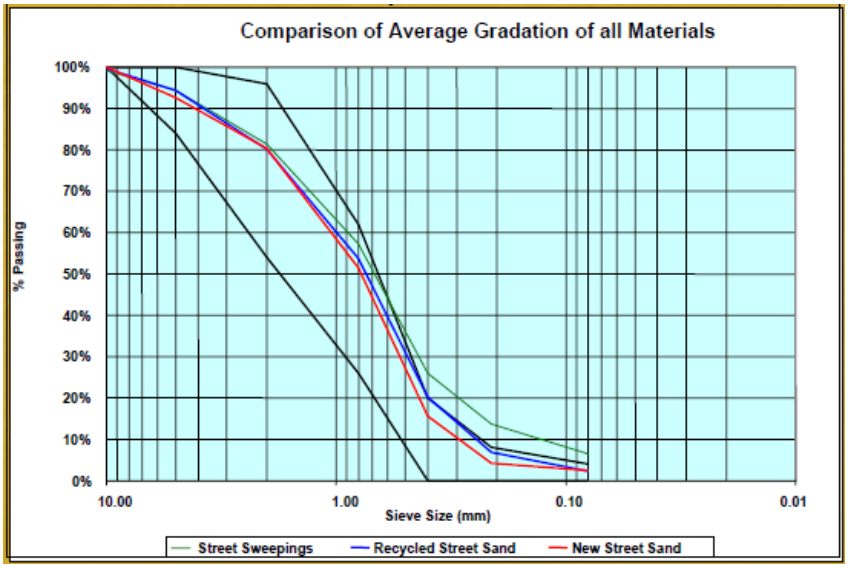


Figure 2.2 Comparaison des courbes granulométriques des résidus de balayage, des sables recyclés et des sables neufs
Tirée de Dunford et Haug (2007, p. 17)

Une autre analyse granulométrique sur les abrasifs récupérés a été réalisée par l'État du Colorado. La campagne d'échantillonnage a été effectuée sur quatre ans et a considéré différents milieux, notamment les cols de montagne du centre nord du Colorado (Pulley et Baird, 2010). Les valeurs moyennes obtenues sont illustrées dans le Tableau 2.9. Le rapport n'indique toutefois pas les granulométries des abrasifs avant épandage pour pouvoir évaluer l'évolution de leur comportement pendant un épisode hivernal.

Les résultats du tamisage montrent une multitude de possibilité de réutilisation, si toutefois des modifications pouvaient être apportées aux spécifications de la norme sur les quantités d'hydrocarbures (Pulley et Baird, 2010).

Tableau 2.9 Analyse granulométrique des abrasifs récupérés au Colorado
Tiré de Pulley et Baird (2010, p. 16)

Tamis	Ouvertures	Moyennes
½ po	0,500 po	99,13
3/8 po	0,375 po	97,64
No 4	0,187 po	87,75
No 8	0,093 po	
No 16	0,046 po	48,02
No 30	0,024 po	
No 50	0,012 po	18,85
No 100	0,006 po	11,98
No 200	0,003	8,72

2.4.5 Abrasion et impact sur l'environnement

L'abrasion des matériaux abrasifs par trafic est, dans bien des cas, à l'origine de la production de poussières de taille inférieure à 10 µm, poussières génératrices de problèmes de santé publique surtout lorsque les abrasifs sont élaborés à partir de granulats siliceux (Gruaz, 2004).

Des études menées à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne montrent que les abrasifs fixent une partie des métaux et c'est à ce titre, que la règlementation Suisse oblige désormais les administrations à effectuer des opérations de ramassage et de traitement avant mise en décharge (Gruaz, 2004).

En Colombie Britannique, une étude menée par le Ministry of Water, Land and Air protection, a établi que les matériaux abrasifs utilisés en entretien hivernal s'accumulent sur les surfaces sèches de la chaussée et représentent une source significative de production de poussière de rue, particulièrement au printemps avant le balayage et au moment où la neige a presque fini de fondre (MWLAP, 2005).

Le mouvement des véhicules sur les grains d'abrasifs produit des poussières, qui sont particulièrement visibles avant le nettoyage de rue, par balayage ou par les pluies du printemps. Ces poussières réduisent la visibilité pour les usagers de la route et sont responsables de l'élévation de la concentration des particules fines dans l'air telles que les PM10, particules de moins de 10 microns de diamètre, détériorant ainsi la qualité de l'air (MWLAP, 2005).

Ces conclusions rejoignent l'étude réalisée par Gertler, selon laquelle l'utilisation d'abrasifs en épandage hivernal peut contribuer à élever le niveau de PM10, particules en suspension dans l'air dont le diamètre est inférieur à 10 μm (Gertler et al., 2006).

À l'issue de l'étude menée en Colombie Britannique, des mesures ont été adoptées afin de pallier à ce problème. Il s'agit de la sélection d'un matériau lavé ou tamisé réduisant la fraction fine et l'utilisation d'un matériau avec une angularité des grains afin d'améliorer le frottement. Ce type de granulats est plus susceptible de demeurer sur la surface de la route réduisant ainsi les quantités et les coûts en abrasifs. L'étude recommande également l'utilisation de matériaux durables moins susceptibles à la dégradation par usure tels que les sables grossiers ou les agrégats concassés durs (MWLAP, 2005).

2.5 Contamination des chaussées et exposition des abrasifs

Les abrasifs épandus puis ramassés par balayage sont exposés, durant un cycle hivernal, à différents types de pollution. Mais la pollution routière reste la source principale de leur contamination. Branchu et al. (2013) indiquent que cette dernière est liée essentiellement aux émissions du moteur à l'échappement, et à l'usure des véhicules, de la chaussée ainsi que des équipements de la route.

La combustion incomplète des hydrocarbures des véhicules, la dégradation des chaussées, celle des pneumatiques et des pièces métalliques sont à l'origine de l'émission de nombreux contaminants de natures chimiques diverses (SETRA, 1995). Les contaminants sont d'abord

émis dans l'atmosphère puis se déposent et se dispersent le long de l'infrastructure routière tout en subissant des transformations physicochimiques (SETRA, 1995).

2.5.1 Pollution routière et origine des polluants

La pollution routière peut être de type temporaire, saisonnière, accidentelle ou chronique (Pagotto, 1999). La pollution temporaire est surtout liée aux travaux de construction de la route. Elle n'est pas directement responsable de la contamination des abrasifs routiers en raison de son caractère ponctuel. De plus, elle est antérieure à la mise en service de la route.

La pollution saisonnière est liée à l'épandage des sels de déglaçage et des saumures en hiver (Pagotto, 1999). Les sels peuvent contribuer à la pollution routière en apportant des petites quantités de métaux. Par ailleurs, ils accélèrent la corrosion des surfaces métalliques des véhicules ainsi que celles des constituants de la route. Cela favorise la mobilité des métaux traces ou métaux lourds, sur la surface de la chaussée et vers les sols environnants (Pagotto, 1999). Il est donc très probable que ce type de pollution contribue à la contamination des abrasifs épandus.

La pollution accidentelle résulte quant à elle, des déversements de produits dangereux sur la chaussée à la suite d'accidents de la circulation. La gravité et l'étendue de cette pollution sont liées à la quantité et à la nature des produits déversés. Ce type d'évènements revêt cependant un caractère aléatoire et peu probable (Pagotto, 1999). De ce fait, il est possible de considérer que la pollution accidentelle ne contribue pas, de manière significative, dans la contamination des abrasifs routiers.

Enfin, la pollution chronique est celle qui découle de l'utilisation de la route. Elle est donc continue et due à plusieurs facteurs : 1) L'abrasion et la corrosion des matériaux constitutifs des véhicules tels que les pneumatiques, les freins, la carrosserie…etc. 2) La combustion du carburant. 3) Les fuites diverses de liquides comme l'huile moteur, l'antigel…etc. 4) L'usure de la chaussée. 5) La corrosion des glissières de sécurité (Pagotto, 1999).

Il est ainsi permis d'affirmer que la contamination des abrasifs épandus durant l'hiver est due essentiellement à la pollution routière de type chronique et saisonnière.

Origine des polluants routiers

Les principales sources de pollution chronique aux métaux, aux metalloïdes et aux hydrocarbures sont liées soit aux véhicules, donc au trafic, soit à l'infrastructure routière (Pagotto, 1999). Les parties des véhicules les plus citées dans la littérature comme étant responsables de la pollution chronique de l'environnement en métaux, en métalloïdes et en hydrocarbures sont : les pneumatiques, les garnitures de frein, la carrosserie et les autres pièces métalliques.

Les pneumatiques et les garnitures de frein

Plusieurs composants entrent dans la composition du pneumatique. Le principal est le caoutchouc, qui est lui-même un mélange de gommes naturelles et synthétiques (essentiellement du polybutadiène-styrène). L'usure mécanique par frottement avec la chaussée, les changements de température, l'oxydation ainsi que les réactions radicalaires sont combinés avec la perte des protections de la gomme et engendrent l'altération graduelle du caoutchouc lors de son utilisation (Pagotto, 1999). Ainsi, des particules d'usure s'échappent des pneumatiques. Leur composition chimique dépend de la nature même de la gomme et de l'âge du pneumatique.

Pogotto indique que ces poussières sont à 60% de nature organique. Les études de ces particules d'usure ont montré qu'elles sont principalement de classe : n-alcane (C_{19} à C_{41}), acides n-alcanoïques, des résines naturelles, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). De plus, différents métaux se retrouvent dans ces poussières d'usure, notamment le plomb et le zinc. Cela s'explique par la présence de composés métalliques utilisés comme additifs. (Pagotto, 1999). Le Tableau 2.10 présente les teneurs des principaux métaux présents dans les pneumatiques.

Tableau 2.10 Teneurs en métaux traces de la gomme de pneumatique, en $\mu g.g^{-1}$
Tiré de Pagotto (1999, p. 80)

Référence	**Cadmium**	**Chrome**	**Cuivre**	**Nickel**	**Plomb**	**Zinc**
Lagerwerff et Spetch (1970)	20-90	-	-	-	-	-
Shaheen (1975)	-	182	247	174	1110	617
Brinkmann (1985)	1	170	245	160	900	610
Sadiq et al. (1989)	-	-	1-46	2,5-18	2-519	-
Hewitt et Rashed (1990)	0.28-4.96	-	5,5-29,3	-	-	-
Muschack (1990)	-	180	250	170	1100	620
Hildeman et al. (1991)	30	-	490	50	160	430

Concernant le freinage, il génère une friction intense des garnitures de freins. Cela provoque une forte chaleur et une usure associée. Des gaz et des particules minérales sont produits. Majoritairement, ces particules sont constituées de métaux traces de particules organiques (13 %) de type organométallique à base de fer, silice, magnésium et baryum (Pagotto, 1999).

Les émissions à l'échappement

La pollution routière est occasionnée également par des émissions à l'échappement, des émissions évaporatives du carburant ainsi que des fuites de carburant, d'huile et de liquide de freinage (Pagotto, 1999).

Pagotto (1999) indique que théoriquement, la combustion d'un hydrocarbure, carburant des véhicules, avec l'oxygène correspond à l'équation chimique suivante:

$$C_xH_y \ + \left(x \ + \frac{y}{4}\right) O_2 \rightarrow \ xCO_2 \ + \frac{y}{2} \ H_2O \qquad (2.1)$$

Idéalement, le produit de cette combustion correspond à du gaz carbonique et de la vapeur d'eau. Or, dans les conditions réelles, ce produit varie selon la composition du combustible (présence de souffre et d'additifs divers) et des conditions de combustion (Pagotto, 1999).

C'est la raison pour laquelle différents polluants sont présents dans les gaz d'échappement :

- du monoxyde de carbone, résultat de la combustion incomplète et rapide du carburant;
- des hydrocarbures présents initialement dans le carburant et d'autres non présents (saturés, insaturés ou aromatiques). Les HAP peuvent être à l'état de gaz, liquide ou solide, libres ou adsorbés sur des poussières ou sur des particules. Les HAP émis à l'échappement et fixés aux poussières et aux particules se déposent rapidement sur et en bordure de chaussée;
- des produits d'oxydation partielle (esters, aldéhydes); des oxydes d'azote;
- des composés métalliques : résultat de la combustion des additifs contenus dans le carburant. Ils sont émis sous forme de particules inorganiques. Le plomb peut être émis sous forme de composé halogéné relativement soluble, d'oxyde moins soluble ou de sulfate et carbonate peu solubles;
- des particules, résultat de la combustion incomplète dans les moteurs, notamment les diésels, suivie de condensation et d'adsorption des gaz d'échappement. Leur composition est étroitement liée aux caractéristiques du carburant lui-même. Mais généralement, elles sont constituées de carbone, d'hydrocarbures adsorbés de différents types dont des HAP, de composés soufrés et de composés minéraux divers (Pagotto, 1999).

Pollution liée à la chaussée

Les chaussées sont constituées en général d'enrobés bitumineux. C'est un mélange de matériaux granulaires et de sable à 95% et de bitume à 5%. Pour des besoins de performance, l'enrobé peut être amélioré avec l'ajout d'adhésifs et de polymères. Le bitume renferme de nombreux hydrocarbures mais aussi des traces de métaux tels que le vanadium, le nickel, le fer, le magnésium et le calcium. Les matériaux granulaires peuvent aussi être la source de

l'apport en métaux des enrobés (Pagotto, 1999). Plusieurs auteurs cités par Pagotto (1999), ont estimé la teneur en métaux des enrobés. Le Tableau 2.15 en présente quelques-unes.

Tableau 2.11 Teneurs en métaux traces des enrobés en $\mu g.g^{-1}$
Tiré de Pagotto (1999, p. 100)

Référence	**Cadmium**	**Chrome**	**Cuivre**	**Nickel**	**Plomb**	**Zinc**	**Remarques**
Shaheen (1975)	-	357	51	1170	102	164	-
Brinkmann (1985)	1-1	340-360	30-80	800-1200	90-100	140-180	Résultats de deux analyses différentes
Muschak (1990)	-	360	50	1170	100	160	Estimation à partir des données publiées par Muschak (1990)
Lindgren (1996)	0,12	<228	<67,8	105,6	2,6	<142,4	Pour un mélange de gabbro et de bitume
Lindgren (1996)	0,13	<62,4	21,6	16,5	18,1	<35,3	Pour un mélange de porphyre et de bitume

Pogotto résume les émissions de polluants dans la Figure 2.3.

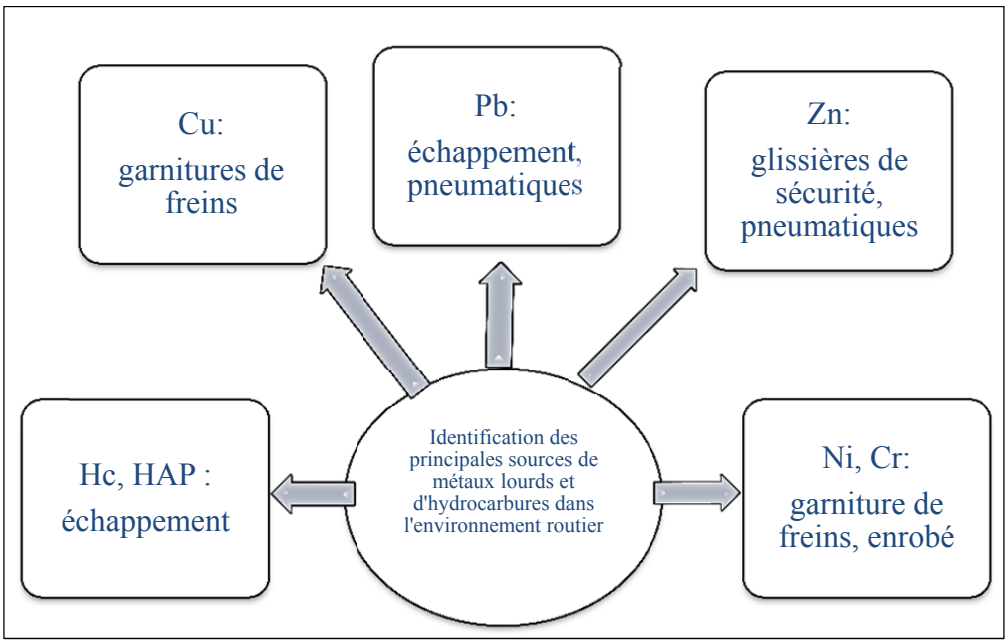


Figure 2.3 Principales sources de polluants routiers
Adaptée de Pagotto (1999, p. 104)

Les particules

Ce sont des poussières de diamètre inférieur à 10 µm, PM_{10} ou bien de diamètre inférieur à 2.5 µm $PM_{2.5}$. Elles se présentent sous forme d'aérosols appelés aussi particules fines, et sont créées par la dispersion dans l'air de solides et de liquides atomisés, de poudres ou de gouttelettes. Elles sont responsables de fumées, de suies, brumes, smog. Elles peuvent être le catalyseur de réactions chimiques (Deletraz et Paul, 1998).

Les métaux lourds et métalloïdes

Les métaux lourds et les métalloïdes sont émis sous forme particulaire. Ils sont aussi appelés éléments traces métalliques (ETM). Les sources de ces ETM dans l'environnement sont multiples : l'industrie, le chauffage, les transports, l'agriculture, les boues et les composts urbains ainsi que l'altération de la roche mère. La circulation automobile et les infrastructures routières constituent aussi des sources d'ETM (SETRA, 2004).

2.5.2 Mouvement des polluants sur la chaussée

Les polluants sont en mouvement constant sur la chaussée. Ils s'accumulent de manière continue grâce à l'apport des différentes sources de pollution. Mais, ils se dispersent aussi par l'action des pluies, des vents et de la circulation des véhicules, etc. (Pagotto, 1999).

Plusieurs auteurs se sont penchés sur les mécanismes d'accumulation et d'enlèvement des polluants et ont proposé des lois pour décrire ces phénomènes. Il est clair que les abrasifs épandus sur la chaussée subissent ces mouvements de polluants.

Mécanismes d'accumulation des polluants sur la chaussée

Pagotto (1999) rapporte qu'il n'y a pas de limite aux dépôts des polluants sur une surface dont la masse peut croître indéfiniment avec le temps t, de manière linéaire ou exponentielle :

$$M(t) = a * t \tag{2.2}$$

Adaptée de Barbé et al (1996)

ou

$$M(t) = a * t^{b,} \quad \text{avec} \quad b < 1 \tag{2.3}$$

Adaptée de Ball et al (1996)

où

M(t) est la masse déposée au temps (t),
T est le temps écoulé depuis le dernier événement nettoyant,
a et b sont des constantes empiriques.

D'autres auteurs précisent que l'érosion des vents, celle de la circulation ainsi que les pertes par dégradation des dépôts (biodégradation, photolyse) réduisent cette accumulation des polluants et la limitent à une valeur maximale selon une loi de la forme (Pagotto, 1999). :

$$M(t) = M_{max} * e^{-c*t} \quad (2.4)$$

Adaptée de Sartor et Boyd (1972)

Ou

$$M(t) = M_{max} * \frac{t}{d + t} \quad (2.5)$$

Adaptée de Valiron et Tabuchi (1992)

où, M_{max} est la valeur maximale qu'il est possible d'accumuler sur la surface, c et d sont des constantes empiriques.

Mécanisme d'enlèvement des polluants au cours d'un événement pluvieux

Selon Pagotto, plusieurs mécanismes sont responsables de l'enlèvement des polluants sur une chaussée lors d'un épisode pluvieux: la mise en solution des polluants hydrosolubles, l'érosion des particules par les gouttes d'eau de pluie et l'eau de ruissellement, ainsi que le transport des polluants dissous et des particules arrachées.

La complexité des phénomènes a mené les auteurs à considérer des formulations globales sans distinction des mécanismes. L'enlèvement est supposé être dépendant du stock initial présent sur la chaussée et des caractéristiques de l'événement pluvieux (Pagotto, 1999). Les lois de l'enlèvement ont la forme suivante :

$$M_e = a * R^b \quad (2.6)$$

Adaptée de Barbé et al (1996)

Ou

$$M_e = M_0 * (1 - e^{-c*R}) \quad (2.7)$$

Adaptée de Sartor et Boyd (1972)

Où

Me est la masse entrainée pendant le temps t,

M_0 est la masse initiale disponible sur la chaussée,
R est la hauteur d'eau précipitée sur le temps t,
a, b, c sont des coefficients de lessivage dépendants des caractéristiques de la chaussée.

Évolution des quantités de polluants présents sur la chaussée en fonction du temps

Les deux mécanismes de mouvements des polluants, accumulation et enlèvement, mentionnés dans les paragraphes précédents, par leurs formules respectives, ont été combinés pour décrire l'évolution, au cours du temps, des quantités de polluants présents sur la chaussée. Cette évolution peut être exprimée par une fonction continue (Pagotto, 1999). L'une des formules utilisée pour représenter donc les deux mécanismes combinés est représentée par la Figure 2.4.

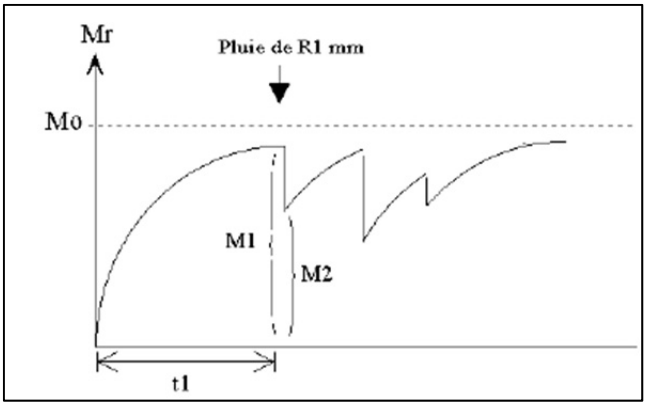


Figure 2.4 Courbe d'accumulation et d'enlèvement
de la pollution sur la chaussée
Tirée de Pagotto (1999, p. 129)

$$M_1 = M_0 * (1 - e^{-k_1 * t_1})$$

$$M_e = M_1 - M_2 = M_1 * (1 - e^{-k_2 * R}) \qquad (2.8)$$

$$M_r(t) = M_0 * (1 - e^{-k_1 * t_1}) * e^{-k_2 * R}$$

Où :

$M_r(t)$ est la masse disponible à la surface au cours du temps t,
k_1, k_2 sont des constantes,
t est le temps cumulé.

2.5.3 Mécanismes d'interaction et de rétention des métaux lourds dans les solides

Le comportement des métaux lourds dépend de leur affinité pour l'oxygène ou pour le soufre/azote Ils ont une configuration électronique particulière qui leur donne un important potentiel de réaction avec les différents constituants du sol (Dubé, 1997). Des systèmes de classification ont été développés pour mettre en évidence les réactions les plus importantes selon la chimie de coordination des métaux. Cette classification suppose une stabilité entre les métaux (accepteurs d'électrons) et les ligands (donneurs d'électrons) (Dubé, 1997).

Mécanismes d'interaction, adsorption et échange cationique

La distribution géochimique des métaux lourds dans les phases solides du sol est tributaire d'un certain nombre de mécanismes : 1) l'adsorption à la surface des minéraux argileux, des oxydes/hydroxydes et des matières organiques ; 2) la précipitation/coprécipitation avec les minéraux secondaires ; 3) la complexation et la coagulation avec la matière organique ; 4) la pénétration des métaux dans la structure cristalline des minéraux primaires. Les paramètres qui régissent ces mécanismes sont nombreux. Cependant, les plus importants sont le PH et le potentiel d'oxydation (Dubé, 1997).

L'adsorption est la fixation d'atomes ou de molécules à la surface solide d'un substrat grâce à différents processus (Deschamps et al., 2006). Il s'agit d'une adsorption de cations métalliques à la surface des particules de sol qui se produit selon trois mécanismes : 1) l'adsorption physique ; 2) l'adsorption chimique (chimisorption) ; 3) la neutralisation des charges de surface par les cations de la double couche électrique (Dubé, 1997). Certains

minéraux sont de meilleurs adsorbants que d'autres en raison de leur grande surface spécifique. C'est le cas des argiles et des zéolites (Deschamps et al., 2006).

L'adsorption physique

Elle résulte de forces électrostatiques et de mécanismes d'échange ionique (Dubé, 1997). Cette force est une attraction électrostatique d'un soluté par une surface polarisée dans le but de garder une électro-neutralité du milieu. Les liaisons qui sont ainsi créées sont faibles. C'est pour cela que généralement, l'adsorption physique est réversible (Deschamps et al., 2006).

L'adsorption chimique

Appelée aussi chimisorption, elle implique la création de liens ioniques ou covalents entre les cations et les sites de rétention de la surface solide (Dubé, 1997). L'adsorption chimique est difficilement réversible. On parle de complexation de surface lorsqu'un ion métallique réagit avec un groupement anionique qui se comporte comme un ligand inorganique (comme OH-, Cl^-, $SO4^-$, CO_3^{2-}) (Deschamps et al., 2006).

La précipitation

La précipitation est le phénomène par lequel une phase solide est susceptible de précipiter quand le produit des activités (concentration) par le coefficient d'activité (α) des ions en solution atteint ou surpasse le niveau de saturation de la solution pour la phase solide. Les cations (M^{n+}) et les anions (ou ligands, L), pouvant former une phase solide, (ML_n), sont reliés par la constante de solubilité de la phase (K_{sp}) (Dubé, 1997), soit :

$$ML_n \Leftrightarrow M^{n+} + nL \tag{2.9}$$

$$K_{sp} = [M^{n+}][L]^n \tag{2.10}$$

Si $[M^{n+}][L] > Ksp$, la solution est sursaturée et la phase solide peut précipiter. Si au contraire, $[M^{n+}][L] < Ksp$, la phase solide va continuer à se dissoudre (Dubé, 1997). Les métaux précipitent principalement sous forme d'hydroxyde, de carbonate, de phosphates ou de sulfures.

Deschamps précise qu'un élément métallique retenu à la surface d'un matériau (physisorptions, complexation, précipitation, chimisorption) sera plus rapidement mis en solution et donc présentera davantage de risques de toxicité que s'il est inséré dans un réseau cristallin du matériau (Deschamps et al., 2006).

2.5.4 Critères génériques

Au Québec, la « *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés*» (PPSRTC) établit les critères génériques qui servent à évaluer l'ampleur d'une contamination pour un sol. Ces critères tiennent compte de la teneur de fond naturelle d'un sol. Les critères A représentent les teneurs de fond pour les substances inorganiques et les limites de quantification pour les substances organiques (MDDEP, 1998). L'annexe II présente la grille des critères génériques des métaux et métalloïdes, des hydrocarbures pétroliers C_{10}-C_{50} et des hydrocarbures aromatiques polycycliques pour les sols, de la PPSRTC.

2.5.5 Taux de contamination

Contamination des résidus du MTQ

En 1995, le MTQ a chargé une équipe de travail de vérifier le degré de contamination des résidus de balayage et de proposer un mode de gestion conforme aux lois et règlements du MEF, actuel MDDELCC. Une campagne d'échantillonnage s'étalant sur deux ans et touchant plusieurs axes autoroutiers des régions de Québec, Montréal, Hull, et de Cap-de-la Madeleine a été entreprise (MTQ, 1995).

Les résultats obtenus ont montré que la concentration en huiles et graisses minérales se situait dans la plage de contamination B-C de la PPSRTC, celle des métaux lourds également, particulièrement le cuivre. Cette étude a également montré que les résidus les plus pollués étaient issus du réseau de la région de Montréal. Il a été recommandé, à la suite de cette étude, un enfouissement sécuritaire pour les résidus de la région de Montréal et un enfouissement dans des lieux d'enfouissement sanitaires autorisés pour les autres abrasifs (MTQ, 1995).

Les résultats obtenus pour les lixiviats ont par contre montré que la concentration en métaux lourds et en huiles et graisses était loin d'atteindre les normes des déchets dangereux; les matériaux ne démontraient pas de potentiel de lixiviation (MTQ, 1995).

2.6 Décontamination des sols et des matériaux

Comme pour les mécanismes de contamination, la littérature ne traite pas en particulier le sujet de la décontamination des abrasifs. Il convient pour approfondir le sujet, de se pencher sur les méthodes de décontamination des sols contaminés.

Selon Gosselin et al. (1999), la décontamination des sédiments, des sols et des boues consiste à la séparation des contaminants de la matrice. Aussi, le but visé par une décontamination est la diminution de la teneur en contaminants de la matrice jusqu'au niveau des critères prescrits par la réglementation en vigueur. Parmi les méthodes de décontamination des sols il y a : 1) la concentration gravimétrique ; 2) la flottation ; et 3) la séparation magnétique (Gosselin et al., 1999).

2.6.1 Le tamisage

Dans un premier temps, les sols contaminés doivent, en général, subir avant leur décontamination, un tamisage. Cette action est importante car elle permet de retirer les gros débris contenus dans le sol. Le tamisage peut être de type stationnaire (la surface du tamisage est statique) ou dynamique (surface de tamisage animée d'un mouvement rotatif, giratoire ou rotatif). Il existe quatre types d'équipements pour effectuer un tamisage industriel : 1) les

grizzlys ; 2) les trommels ; 3) les tapis vibrants ; 4) et les tapis giratoires. La performance de ces équipements est déterminée par leur capacité et leur efficacité (Gosselin et al., 1999).

2.6.2 La concentration gravimétrique

Le principe de la concentration gravimétrique est l'exploitation de la différence de masse volumique entre les matériaux. Le processus correspond à la réalisation d'une séparation des phases du mélange grâce à la gravité et à la différence de forces. Cette séparation est aussi affectée par le volume et la forme des particules. Pour réduire l'effet de ses deux facteurs il faut limiter la taille des particules de l'alimentation grâce à un tamisage ou à une classification préalable (Gosselin et al., 1999).

La concentration gravimétrique s'effectue de préférence dans l'eau, en raison de la masse volumique élevée de cette dernière. Sous l'effet de la gravité et/ou d'une autre force, les particules baignant dans le fluide (l'eau) entrent en mouvement les unes par rapport aux autres et forment deux couches distinctes avec des masses volumiques différentes. La concentration gravimétrique permet de séparer les particules en fonction de leur masse volumique. On s'assure de l'applicabilité de cette approche grâce à la formule suivante (équation 2.11):

$$Critère\ de\ concentration = \frac{(\rho_H - \rho_M)}{(\rho_L - \rho_M)} \tag{2.11}$$

où :

ρ_H représente la masse volumique de la phase solide lourde ;
ρ_L représente la masse volumique de la phase solide légère ;
ρ_M représente la masse volumique du liquide

On procède à la séparation des phases par différents moyens. La Figure 2.5 représente les différents mécanismes de séparation gravimétrique.

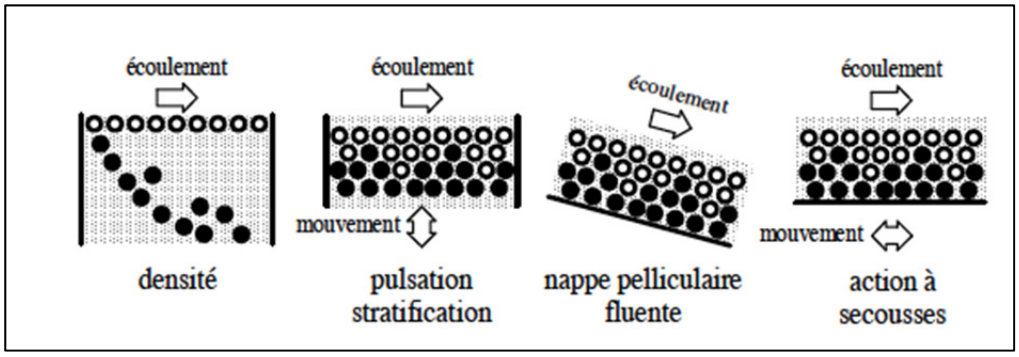


Figure 2.5 Les mécanismes de séparation par concentration gravimétrique
Tirée de Gosselin et al. (1999, p. 84)

La concentration gravimétrique est applicable à la décontamination de matrices comportant exclusivement des contaminants en phase solide. Il s'agit de composés inorganiques tels que les métaux sous forme métallique, oxydée ou sulfurée (Gosselin et al., 1999).

2.6.3 Flottation, séparation magnétique et séparation électrostatique

Flottation

Le principe de la flottation s'appuie sur les caractères hydrophobe et hydrophile des surfaces des solides. Ces deux propriétés peuvent être stimulées, si nécessaire, lors de la réalisation de la flottation grâce à des ajouts de réactifs appropriés dans l'eau servant de solution aqueuse. Le produit de la flottation est le concentré chargé de contaminants et le rejet qui représente la matrice décontaminée (Gosselin et al., 1999).

Pour réaliser la flottation, on introduit de l'air sous forme de petites bulles dans le milieu contenant le sol contaminé (milieu aqueux appelé pulpe). Les particules hydrophobes se fixent, après collision aux bulles d'air, de nature non-polaire, puis sont transportées vers le haut de la pulpe de manière sélective. Elles forment alors une mousse chargée de contaminants. C'est le concentré. D'autre part, les particules ayant des surfaces hydrophiles ne se lient pas aux bulles d'air et restent en suspension dans la pulpe. Cette pulpe restante

constitue le rejet et est composée de la matrice décontaminée (Gosselin et al., 1999). La Figure 2.6 montre comment se fixent les particules aux bulles d'air.

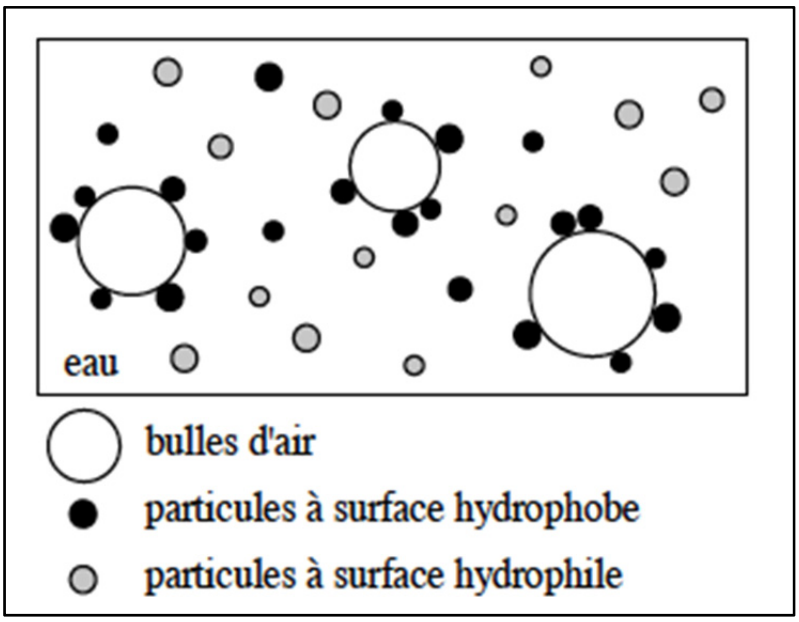


Figure 2.6 Fixation des particules à surface hydrophobe aux bulles d'air
Tirée de Gosselin et al. (1999, p. 102)

Les moussants, les collecteurs, les déprimants et les activants sont des réactifs de flottation. La stabilité de la mousse est assurée par les moussants. Les collecteurs ont pour fonction d'adhérer aux surfaces afin de les rendre hydrophobes alors que les déprimants rendent les surfaces hydrophiles (Gosselin et al., 1999).

La plupart des contaminants inorganiques de nature métallique (cuivre, zinc, ...) peuvent être concentrés par flottation. De même, les contaminants organiques à caractère hydrophobe comme les hydrocarbures pétroliers (HCx), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les biphényles polychlorés (BPC) peuvent être concentrés de la même façon (Gosselin et al., 1999).

La séparation magnétique

Cette méthode de décontamination s'appuie sur l'exploitation des propriétés magnétiques des matériaux pour réaliser la séparation. Les matériaux peuvent être : 1) ferromagnétiques avec une susceptibilité magnétique très forte ; 2) ou paramagnétiques avec une susceptibilité magnétique faible ; 3) ou encore diamagnétiques avec une susceptibilité nulle (Gosselin et al., 1999).

La séparation est réalisée lors du passage des matériaux à travers un champ magnétique produit par un aimant permanent ou par un électroaimant. Les électroaimants comportent plusieurs avantages car ils permettent d'ajuster l'intensité du champ en variant l'intensité du courant électrique. Cette propriété est intéressante car la grosseur et la masse volumique des particules ou morceaux devant être séparés influencent le traitement. En effet, la séparation des grosses particules denses requiert un champ magnétique plus intense que la séparation des petites particules légères nulle (Gosselin et al., 1999).

La séparation électrostatique

La séparation électrostatique tire profit de la différence de conductivité électrique qui existe entre les matériaux afin d'accomplir leur séparation. Cette technique s'applique à un nombre relativement restreint de minéraux tels que le rutile, l'ilménite, le zircon, l'étain, les phosphates et certains sels. Elle peut aussi s'appliquer à la séparation de particules métalliques dans le sable. Il existe deux types de séparateurs: - les séparateurs électrostatiques et les séparateurs électrodynamiques (aussi appelés séparateurs à haute tension) (Gosselin et al., 1999).

2.6.4 L'hydrocyclonneur et la séparation centrifuge

Séparation gravitaire et force centrifuge

La classification d'un sol désigne la séparation de ses particules en fonction de leur taille. Le processus se base sur le principe des vitesses terminales de chute différentes. Trois comportements sont possibles pour une particule solide soumise à l'attraction gravitationnelle, tel qu'illustré par la Figure 2.7. (Gosselin et al., 1999).

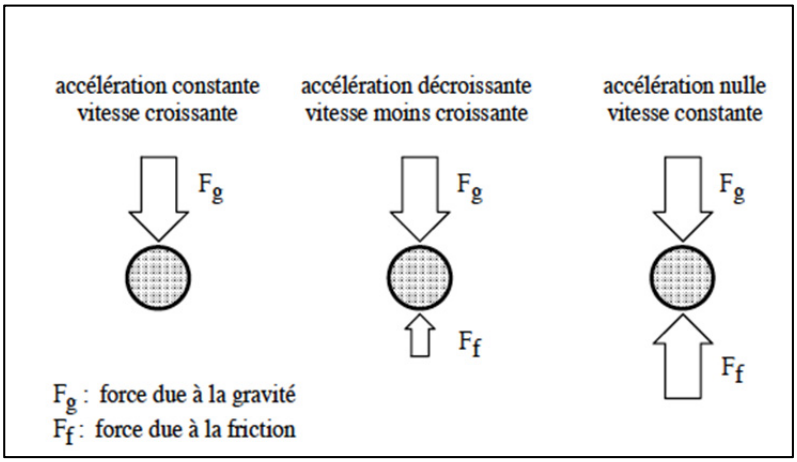


Figure 2.7 Les trois comportements possibles pour une particule solide soumise à l'attraction gravitationnelle
Tiré de Gosselin et al. (1999, p. 73)

Lorsqu'un mélange solide-liquide au repos est soumis à la force de gravité, les particules plus denses que le fluide sédimentent. Ainsi, en fonction de la taille et de la densité des particules, la pesanteur force les particules à chuter avec une vitesse contrôlée par la force d'Archimède et la viscosité du fluide dans lequel elles baignent (Davailles, 2011). Cette méthode de séparation gravitaire n'est toutefois pas efficace en toute situation.

Afin d'augmenter la vitesse de séparation, il est possible d'utiliser une force centrifuge. C'est la séparation centrifuge. Ce procédé permet de réaliser une séparation en fonction de la masse

des particules présentes dans la solution. C'est le principe de la force d'inertie d'un objet soumis à une force de rotation (Davailles, 2011).

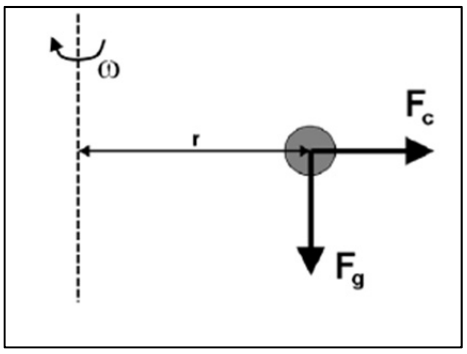


Figure 2.8 Particule soumise à la gravité et à la force centrifuge
Tirée de Davailles (2011, p. 25)

Ainsi si on compare le poids d'une particule de masse $m_p = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6}$ à la force centrifuge appliquée pour une vitesse de rotation de ω :

$$F_g = m_p g \tag{2.12}$$

$$F_c = m_p \omega^2 r \tag{2.13}$$

Où :

F_g représente le poids ou encore la force de gravité ;
F_c représente la force centrifuge ;
M_p représente la masse de la particule ;
ρ_p représente la masse volumique de la particule ;
d_p représente le diamètre de la particule ;
g représente la gravité ;

ω représente la vitesse de rotation ;

r représente la distance du centre de rotation au centre de gravité de la particule.

On obtient ainsi les vitesses caractéristiques suivantes :

$$V_g = \frac{g(\rho_p - \rho_l)\, d_p^2}{18\, \mu_l} \tag{2.14}$$

$$V_c = \frac{\omega^2\, r(\rho_p - \rho_l)\, d_p^2}{18\, \mu_l} \tag{2.15}$$

Sous l'hypothèse que la force de trainée est régie par la loi de Stokes

$$\begin{aligned} \rho_l \frac{V_g\, d_p}{\mu_l} &\ll 1 \\ \rho_l \frac{V_c\, d_p}{\mu_l} &\ll 1 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Finalement on obtient :

$$V_c = \frac{\omega^2\, r}{g} V_g \tag{2.17}$$

Le rapport $\frac{\omega^2\, r}{g}$ est appelé le coefficient de centrifugation. C'est le nombre de G subi par la particule (Davailles, 2011).

L'hydrocycloneur

L'hydrocycloneur est utilisé comme séparateur de phase d'un mélange liquide/solide ou liquide/gaz ou encore gaz/solide. Dans le cadre de cette recherche, c'est l'hydrocycloneur liquide /solide qui sera abordé.

C'est un équipement très simple. Il a une forme conique et utilise la force centrifuge afin de séparer les particules. Les effets combinés de la forme spécifique de l'appareil ainsi que ceux de la pression à laquelle est injectée la pulpe, sont à l'origine de la force centrifuge. Cette force étant plus puissante que la force due à l'attraction gravitationnelle, le temps requis pour accomplir la séparation est considérablement réduit (Gosselin et al., 1999).

Écoulement dans un hydrocyclonneur

Dans l'hydrocycloneur, le liquide diphasique est injecté tangentiellement dans le corps principal de forme cylindrique. L'injection tangentielle met le fluide en rotation à grande vitesse (Gosselin et al., 1999).

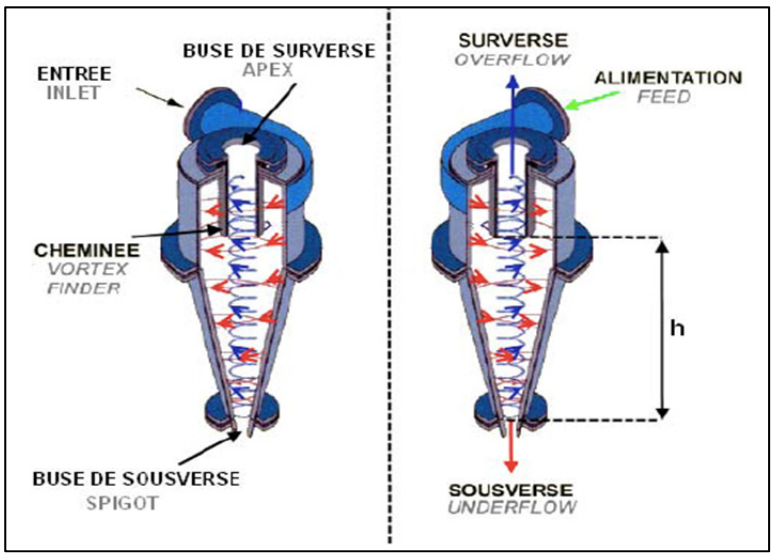


Figure 2.9 Principe de fonctionnement d'un hydrocycloneur
Tirée de Davailles (2011, p. 27)

Davailles (2011) précise que sous l'effet de la force centrifuge, les particules de masse volumique plus importante que le fluide où elles baignent sont elles aussi, mises en rotation à grande vitesse dans le corps de l'hydrocycloneur et sont projetées vers les parois du cylindre principal sous l'effet d'une sédimentation radiale accélérée.

L'accélération centrifuge peut atteindre plusieurs milliers de fois l'accélération de la pesanteur, jusqu'à 50 000 G dans un cyclone de 10 mm de diamètre. Le sédiment qui s'est constitué sur la paroi va s'écouler le long du cône formant la zone d'évacuation de la phase solide concentrée (sousverse ou buse de sousverse) (Davailles, 2011).

Pour leur part, les particules dont la vitesse terminale de chute est faible, sont circonscrites dans le centre de l'hydrocycloneur. Lorsqu'elles atteignent le bas du cône, elles sont repoussées vers le haut et sortent par le dessus de l'appareil. Ce phénomène est dû à la présence d'un étranglement au bas du cône qui a pour fonction de repousser le courant de particules vers le haut où se trouve le diaphragme de sortie (surverse ou buse de surverse) (Gosselin et al., 1999).

Trois paramètres peuvent être manipulés afin de varier les conditions d'opération : 1) la densité du fluide ; 2) Le débit et la pression de l'alimentation ; 3) le diamètre du diaphragme de sortie et celui de la buse de décharge. C'est en ajustant ces paramètres qu'il est possible d'améliorer l'efficacité de l'hydrocycloneur (Gosselin et al., 1999).

Plusieurs théories existent pour décrire la séparation qui a lieu dans l'hydrocycloneur. Vieira et al (2005) indiquent que celle qui décrit le mieux ce phénomène est la théorie du « temps de séjour » (Vieira et al., 2005). Cette approche, proposée par Rietema (1961), considère qu'une particule d'une taille donnée sera recueillie si son temps de séjour à l'intérieur du cyclone est égal ou supérieur au temps nécessaire pour qu'elle atteigne la paroi (Vieira et al., 2005).

Sous certaines hypothèses, la théorie du temps de séjour donne l'équation suivante :

$$\frac{d_{50}}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q (\rho_s - \rho)}\right] \quad (2.18)$$

Où :

d_{50} représente la maille de coupure;
D_c représente le diamètre de l'hydrocycloneur;
μ représente la viscosité du fluide;
ρ_s représente la masse volumique de la particule;
ρ représente la masse volumique du fluide;
Q représente le débit d'alimentation;
K constante tenant compte de la géométrie de l'hydrocycloneur.

Bradley (1965) propose dès 1965 la « théorie d'équilibre orbitale » qui est basée sur le concept du rayon d'équilibre. La valeur de la taille de coupure est alors contrôlée par le bilan entre deux forces radiales opposées : la force centrifuge vers l'extérieur et la force de trainée induite par l'écoulement et dirigée vers le cœur du cyclone. Pour des particules isolées et un écoulement laminaire, Bradley (1965) a proposé l'expression suivante pour une maille de coupure d_{50} (Davailles, 2011).

$$d_{50} = K \left[\frac{\mu D_c^3}{Q (\rho_s - \rho)}\right] \text{^} n \quad (2.19)$$

Les grandeurs usuelles sont disponibles dans la Nomenclature, k est une constante tenant compte de la géométrie et n est une constante hydrodynamique généralement prise égale à 0,5) (Davailles, 2011). Cette approche permet d'estimer le dimensionnement et d'évaluer les performances des hydrocycloneurs dans des cas de solution à faible concentration de solide et pour des géométries semblables en forme et en taille à celles utilisées par les auteurs (Davailles, 2011).

D'autres modèles empiriques décrivent le comportement d'un hydrocycloneur à partir d'équations mathématiques qui relient les mesures d'entrée aux mesures de sortie. Ces modèles sont simples d'utilisation et ne nécessitent pas une connaissance du déplacement de la matière à l'intérieur du cyclone (Mai Manga, 2011).

2.6.5 Décontamination des hydrocarbures

Le Colorado Department of Transportation (CDOT) a adopté plusieurs mesures afin d'atténuer l'impact des matériaux abrasifs sur l'environnement. Parmi ces mesures, figurent le balayage des rues et l'utilisation de bassins de rétention pour contenir le sable provenant des routes, avant qu'il ne migre vers les cours d'eau. Le balayage des rues a permis la récupération de 100 000 tonnes en 2004 – 2005 (Pulley et Baird, 2010).

Cette accumulation a amené le CDOT à réfléchir à un moyen de réutiliser ces résidus. Une recherche a été initiée dans ce sens par cette administration. L'étude a ensuite permis de caractériser et de comparer la contamination chimique des sables récupérés par balayage et ceux retenus dans les bassins de rétention.

Les résultats ont montré un niveau de concentration en métaux (arsenic, baryum, cadmium, chrome, cuivre, plomb, mercure, sélénium, argent, zinc) inférieur aux concentrations de fond du Colorado dans les deux cas (Pulley et Baird, 2010). Par contre, l'étude a révélé que ces sables sont contaminés aux produits pétroliers TPH « Total Petroleum Hydrocarbons » et aux huiles et graisses.

Pour les besoins de l'étude, deux fractions granulométriques ont été considérées et testées : la fraction > 0.85 mm et la fraction < 0.8 mm. Le Tableau 2.12 et la Figure 2.10 montrent les concentrations en produits pétroliers obtenus.

Tableau 2.12 Résultats de TRPH pour les fractions de matériaux abrasifs récupérés
Tiré de Pulley et Baird (2010, p. 22)

Location Type	**Sample Description**	**TRPH Result (mg/kg)**
Basin	Initial (Pre-Sieved)	450
	<0.85 mm Fraction	730
	>0.85 mm Fraction	660
Roadway	Initial (Pre-Sieved)	1700
	<0.85 mm Fraction	2200
	>0.85 mm Fraction	1100

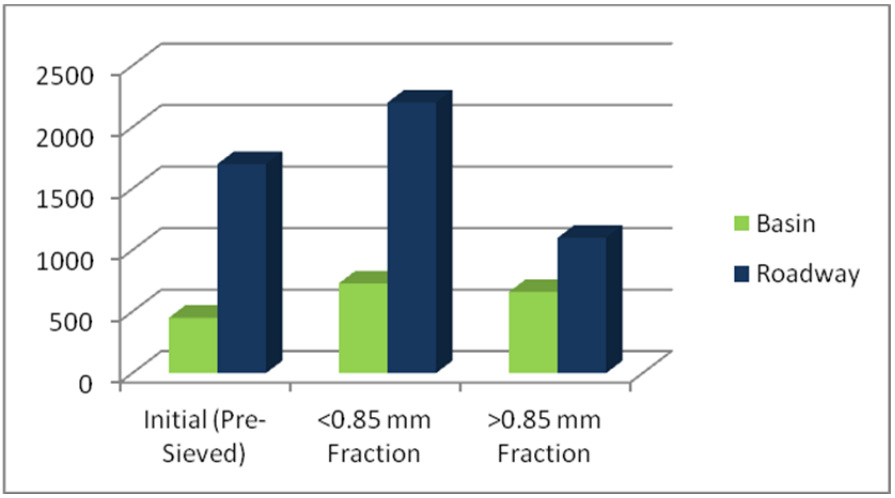


Figure 2.10 Diagramme des résultats de TRPH pour les fractions de matériaux abrasifs récupérés
Adapté de Pulley et Baird (2010, p. 13)

Les résultats de l'étude ont fait ressortir que les fractions < 0.85 mm ont un TRPH plus élevé. De plus, les sables récupérés par balayage ont un TRPH supérieur à celui du sable provenant du bassin. Il est supposé dans cette étude que les échantillons provenant du balayage de rue pourraient contenir des débris provenant des enrobés bitumineux des chaussées et qu'il est possible que cela ne soit qu'un effet d'accumulation de débris (Pulley et Baird, 2010).

Par ailleurs, cette recherche a procédé à un essai de compostage des échantillons pour déterminer si un vieillissement à court terme, avec ou sans manipulation, pouvait réduire potentiellement ou éliminer carrément, le taux de TRPH et des huiles et graisses. Le but de cette approche était de mettre au point une méthode simple de réduction des contaminants d'origine pétrolière.

Quatre chambres d'essai ont été utilisées pour ce test. Chacune a été remplie de résidus de balayage. Des mesures correctives ont été apportées pour simuler le vieillissement. La Figure 2.11 montre les chambres d'essais de compostage.

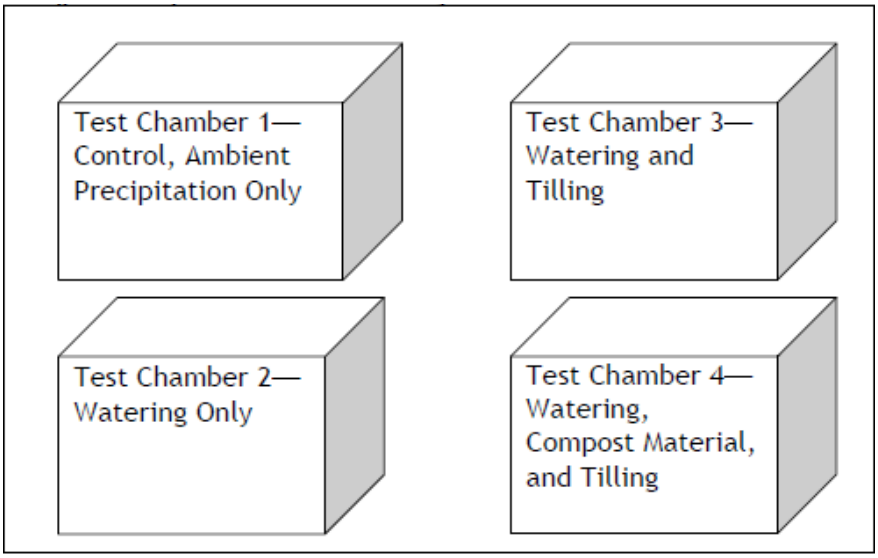


Figure 2.11 Plan du test des chambres expérimentales
Tirée de Pulley et Baird (2010, p. 18)

Les différentes conditions imposées sont : 1) précipitations ambiantes seulement, 2) humidité seulement, 3) humidité et mixage, 4) humidité, matériau de compostage et mixage.

Le but de l'expérience était de vérifier si une biodégradation de la contamination aux produits pétroliers et aux huiles et graisses était envisageable dans chacun des cas de figure. La durée de l'expérience de compostage était de 6 mois, pendant lesquels, des mesures ont été prises afin de déterminer les conditions exactes dans les chambres (Pulley et Baird, 2010).

Le monitoring relevait les données suivantes : l'humidité et la température du sol, la quantité de pluie locale, les aspects généraux des chambres expérimentales et la photographie de chaque chambre expérimentale.

Les taux de TRPH obtenus au bout de six mois, tel qu'illustrés dans la Figure 2.12, montrent que, hormis la chambre 2 où les taux ne varient pas, les trois autres chambres ont enregistré des diminutions des mesures du TRPH. Toutefois, la concentration en produits pétroliers et en huiles et graisses demeure élevée par rapport aux exigences de la règlementation en vigueur au Colorado (Pulley et Baird, 2010).

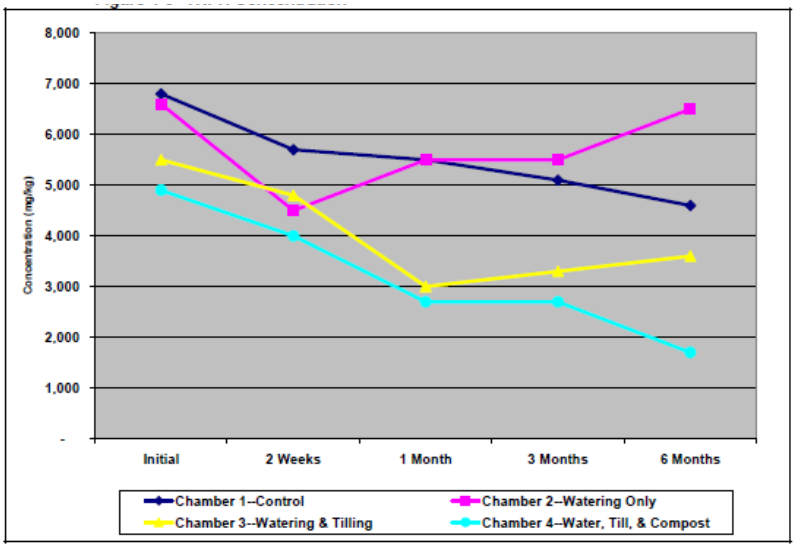


Figure 2.12 Concentrations en TRPH
Tirée de Pulley et Baird (2010, p. 24)

Cette étude a recommandé de réutiliser les résidus de balayage comme mélanges aux matériaux granulaires de classe ABC, après nettoyage. Le nettoyage consiste à tamiser les résidus pour éliminer les gros débris, à les laver pour éliminer les sels avec lesquels ils auraient été potentiellement mélangés et enfin à les mélanger avec d'autres agrégats (Pulley et Baird, 2010).

2.7 Pratique du Québec en matière de gestion des sels et des abrasifs

2.7.1 Politique de développement durable

Le Québec a entrepris d'instaurer une nouvelle orientation dans ses pratiques courantes envers le respect de l'environnement et du développement durable, et cela en adoptant en avril 2006 la loi sur le développement durable (L.R.Q., c. D-8.1.1). Le Gouvernement du Québec a convié, par cette action, l'ensemble des ministères, des organismes et des partenaires ainsi que la société québécoise à y participer.

L'objectif visé était de concourir à mieux intégrer la recherche d'un développement durable dans les politiques, les programmes et les actions de l'administration publique québécoise. Il visait également à assurer, notamment par la prise en compte des principes de développement durable définis dans cette stratégie, la cohérence des engagements poursuivis par les organisations en vue d'atteindre les objectifs retenus. Pour concrétiser cette résolution gouvernementale, le MTQ a mis en œuvre la « Stratégie québécoise pour une gestion environnementale des sels de voirie ». Elle a été adoptée puis mise en œuvre par le MTQ et ses autres partenaires (le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, le ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, l'Union des municipalités du Québec et la Fédération Québécoise des Municipalités) (MTQ, 2010a).

À travers le Plan ministériel de gestion environnementale des sels de voirie édition 2011-2014, le MTQ réaffirme sa volonté d'améliorer en continu ses pratiques de gestion en respectant les principes du développement durable, notamment la diminution des impacts sur l'environnement des sels de voirie et des abrasifs (MTQ, 2011). La stratégie du plan du MTQ est axée sur un entretien responsable du réseau routier sous sa responsabilité. L'objectif de la nouvelle gestion des sels de voirie est de diminuer les impacts sur l'environnement liés à l'utilisation des sels pour le déglaçage des chaussées, sans pour cela compromettre la sécurité des usagers (MTQ, 2011).

Le plan définit les lignes directrices pour encadrer les activités relatives à l'aménagement et à l'exploitation des centres d'entreposage et de manutention de sels et d'abrasifs afin d'assurer une protection adéquate de l'environnement. Ce plan visait une réduction importante de la quantité des sels de voirie utilisés pour le déglaçage des routes québécoises (MTQ, 2011).

Réseau routier québécois

La description du réseau routier québécois permet d'entrevoir les quantités importantes d'abrasifs utilisés pour le déglaçage des routes. Le réseau routier du Québec compte plus de 285 000 km de routes. 30 600 km relèvent de la responsabilité du MTQ, 103 000 km sont pris en charge par les municipalités du Québec. Les Tableaux 2.13 et 2.14 dressent l'envergure et le classement du réseau routier.

Tableau 2.13 Répartition du réseau routier québécois
Adapté de MTQ (2013)

	Réseau (km)	**Ratio (%)**
Municipalités	103 000	36
MTQ	30 600	11
Total (incluant d'autres réseaux)	285 000	100

Tableau 2.14 Classement du réseau routier du MTQ
Adapté de MTQ (2013)

Réseau	**Caractéristique**	**Longueur (km)**
Autoroutier	L'ensemble des infrastructures autoroutières.	5 809
National	Les routes interrégionales et celles reliant entre elles les grandes agglomérations. (> 25 000 hab.)	9 131
Régional	Lien entre les agglomérations secondaires (de 5 000 à 25 000 hab.) et les grandes agglomérations.	5 523
Collecteur	Relie les petites agglomérations (< 5 000 hab.) aux agglomérations plus importantes.	7 835
Accès aux ressources	Mène à des zones d'exploitation forestière ou minière, à des chantiers d'exploitation hydroélectrique ou à des zones de récréation et de conservation relevant de l'État.	2 333
Total		30 631

Niveaux de service

La notion de niveau de service détermine la quantité de sels de voirie et d'abrasifs utilisés pour le déglaçage des chaussées. Plus le niveau requis est exigeant, plus grande est la quantité utilisée. En période hivernale, le MTQ détermine les niveaux de service requis pour chaque classe de route sous sa responsabilité, en fonction de deux principaux critères : la classification fonctionnelle du réseau et le débit de circulation journalier moyen en période hivernale (DJMH). Le Tableau 2.15 résume les niveaux de service.

Tableau 2.15 Détermination du niveau de service
Tiré de Base de données sur la neige et le verglas – Édition 2010

Classification fonctionnelle	**DJMH V/J**	**Niveau de service**	**Service requis pour le niveau**
Autoroute		Chaussée dégagée	chaussée dont les voies de roulement, y compris les accotements, doivent être exemptes de neige et de glace sur toute la largeur
Route nationale	>2500	Chaussée dégagée	chaussée dont les voies de roulement, y compris les accotements, doivent être exemptes de neige et de glace sur toute la largeur
	≤ 2500	Chaussée partiellement dégagée	chaussée dont les voies de roulement doivent être exemptes de neige et de glace sur 3m de largeur dans les sections droites et sur 5m de largeur aux points critiques
Route régionale	>2500	Chaussée dégagée	chaussée dont les voies de roulement, y compris les accotements, doivent être exemptes de neige et de glace sur toute la largeur
	≤ 2500	Chaussée partiellement dégagée	chaussée dont les voies de roulement doivent être exemptes de neige et de glace sur 3m de largeur dans les sections droites et sur 5m de largeur aux points critiques
Route collectrice et accès aux ressources	>2500	Chaussée dégagée	chaussée dont les voies de roulement, y compris les accotements, doivent être exemptes de neige et de glace sur toute la largeur
	de 500 à 2500	Chaussée partiellement dégagée	chaussée dont les voies de roulement doivent être exemptes de neige et de glace sur 3m de largeur dans les sections droites et sur 5m de largeur aux points critiques

2.7.2 Exemples de gestion municipale des abrasifs au Québec

A/ Ville de Granby

Le réseau routier de la ville de Granby s'étend sur près de 500 km et comprend des artères principales ainsi que des routes locales et collectrices. Le débit journalier moyen annuel (DJMA) sur les principales routes de la ville varie de quelques centaines à plus de 10 000 véhicules par jour (Ville de Granby, 2012a; 2012b).

Viabilité hivernale – conditions climatiques

Le relevé des quantités de précipitations de neige par cycle hivernal, effectué régulièrement par les services des travaux publics de la ville de Granby depuis 1960, montre que la Ville reçoit en moyenne 2,77 m de neige par hiver. La Figure 2.13 montre l'évolution des précipitations durant les cinquante dernières années.

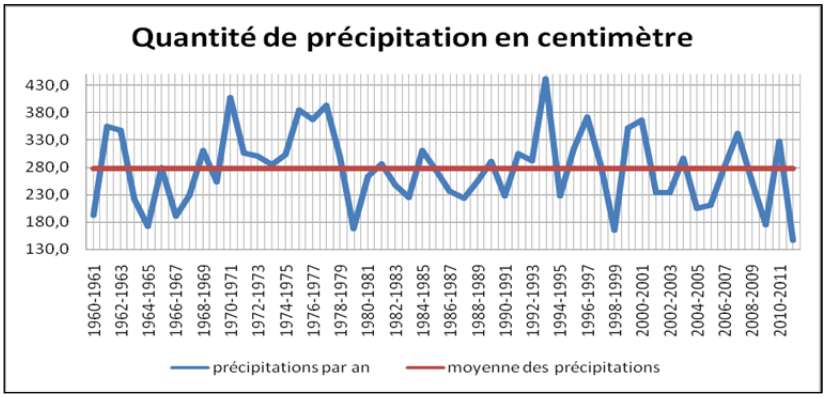


Figure 2.13 Variations des précipitations de neige dans la ville de Granby par cycle hivernal et moyenne des précipitations. Tirée de Ville de Granby (2012a)

Consciente de l'importance d'améliorer la qualité de l'environnement, la ville de Granby a opté pour une action écologique concrète concernant l'application des sels de voirie. La ville prend en compte le fait que, les sels de voirie sont classifiés comme produits toxiques (LCPE, 1999) et qu'une véritable alternative aux sels et aux chlorures devient inévitable.

Les services des travaux publics de Granby ont entrepris à cet effet, de modifier leurs pratiques d'entretien hivernal dans certains quartiers test, dits « quartiers blancs ». Ainsi, depuis 2010, seul l'épandage des abrasifs sur un fond de neige durcie est toléré sur certaines rues. La ville affirme que ces nouvelles pratiques d'entretien seront étendues à plusieurs autres quartiers dans les années à venir (Ville de Granby, 2012a).

Le relevé des quantités d'abrasifs épandues est tenu à jour depuis 1994 par le service des travaux publics de Granby. Le Tableau 2.16 présente les quantités de matériaux abrasifs utilisées durant la période 1994-2013.

Tableau 2.16 Quantités de matériaux abrasifs consommées par cycle hivernal.
Tiré de Ville de Granby (2012a)

Cycles	**94 – 95**	**95 - 96**	**96 - 97**	**97 - 98**	**98 - 99**	**99 - 00**	**00 - 01**	**01 - 02**	**02 - 03**	**03 - 04**	**04 - 05**	**05 - 06**	**06 - 07**	**07 - 08**	**08 - 09**	**09 - 10**	**10 - 11**	**11 - 12**	**12 - 13**
Pierre utilisée (t.m)	1 900	1 528	300	2 904	780	850	1 880	756	1 759	1 321	1 950	2 041	2 500	3 576	3 737	1 375	3 169	4 000	3 008

Les données disponibles permettent ainsi de schématiser la variation de la consommation des abrasifs suivant les différents cycles. La Figure 2.14 représente la variation de la consommation des abrasifs sur une période de 19 cycles hivernaux à partir de 1994.

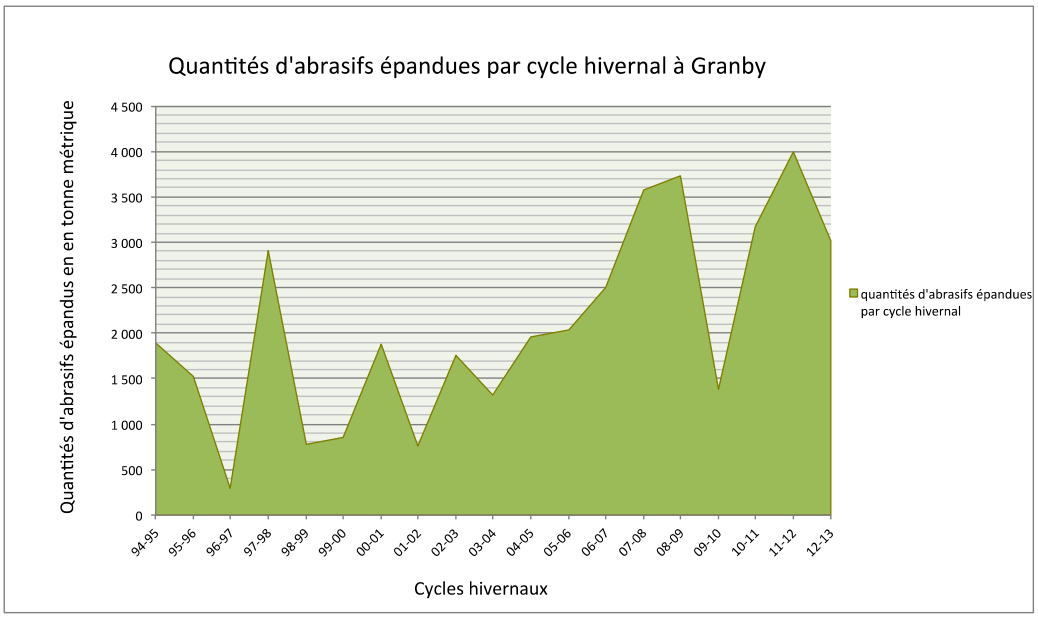


Figure 2.14 Quantités d'abrasifs épandues par cycle hivernal
Tirée de Ville de Granby (2012a)

Gestion des résidus de balayage

L'opération de balayage du printemps, à titre d'entretien printanier, génère de grandes quantités de matières, dites « balais de rue » ou résidus de balayage, a priori contaminées, qui sont généralement entreposées ou enfouies dans des sites aménagés. Cependant, depuis quelques années, la ville de Granby ne procède plus à l'enfouissement systématique des résidus de balayage. Ces derniers sont stockés provisoirement dans un site d'entreposage spécialement aménagé à cet effet, en attendant de trouver le moyen de les réhabiliter. La ville s'est ainsi constituée une réserve considérable de matériaux à recycler

De plus, considérant l'intérêt de la Ville à élever le nombre de « quartiers blancs », une augmentation de la consommation des matériaux abrasifs et par conséquent, un accroissement des quantités de résidus ramassés par balayage, sont à prévoir.

B/ Ville de Sherbrooke

La Ville de Sherbrooke, sous l'égide du MDDEFP a entrepris, depuis 2008, un projet pilote d'évaluation du potentiel de valorisation des abrasifs, récupérés durant le balayage de printemps des rues de la ville, notamment en les réutilisant comme matériaux de déglaçage (Ville de Sherbrooke, 2011). Selon le rapport de la Ville de Sherbrooke, 6 025 tonnes métriques de matériaux brutes, provenant des résidus de balayage de rue et des résidus de puisard, ont été récupérées durant l'année 2010. Après tamisage et lavage, 4 396 tonnes métriques de résidus, soit 73 %, ont été valorisées. La partie grossière récupérée, a été réutilisée comme matériaux de recouvrement journalier au site de Bury. Les parties fines ont été rejetées dans les bassins de sédimentations de la Sablière Champagne (Ville de Sherbrooke, 2011).

À la lumière des résultats de ce projet pilote, la caractérisation environnementale des résidus de balayage de rue et de puisard a révélé que depuis 2008, aucun effet cumulatif n'a été observé pour les résidus valorisés. Toutefois, ce projet met en évidence la qualité médiocre du produit final récupéré. La partie fine (sable) semble causer des problèmes au moment de

l'épandage des abrasifs. La ville comptait en réduire cette fraction du matériau durant le cycle de nettoyage (Ville de Sherbrooke, 2011).

C/ Ville de Québec

La Ville de Québec a entrepris un plan de réutilisation des résidus de balais en 2009. La municipalité considérait les matériaux récupérés durant le printemps comme des matières résiduelles. Ces matières étaient disposées dans des sites d'enfouissement autorisés. En 2008, la Ville a déposé 12 090 tonnes de résidus dans deux sites d'enfouissement (Ville de Québec, 2009).

Le coût total de l'opération fut de 313 000 $ (26 $/tonne). Les Services de l'environnement et des travaux publics, ont évoqué la possibilité de récupérer les résidus qui sont composés à plus de 80 % de matières abrasives (sable et petit gravier), de les tamiser et de les réutiliser.

La Ville a ainsi effectué des analyses physico-chimiques qui ont confirmé le potentiel réutilisable des résidus pour des fins de remblayage des coupes de rues et leur sous-fondation. Des démarches sont en cours pour poursuivre la réflexion et mettre en œuvre un tel projet. Selon la Ville de Québec, la réalisation d'un tel projet permettrait à la fois des économies budgétaires et une réduction des gaz à effet de serre, générés par les transports aux sites d'enfouissement (Ville de Québec, 2009)

2.8 Expériences de réutilisation des abrasifs

Expérience d'Edmonton

En 2004, le « City of Edmonton Transportation », le « Street Department » ainsi que le « Edmonton Waste Management center of excellence » se sont associés pour apporter des solutions à la gestion des sables de rue. Un projet pilote a été initié afin d'évaluer la

faisabilité du recyclage des résidus de balayage de rues. Ce projet a reçu une subvention du Fond Municipal Vert de la Fédération Canadienne des Municipalités (FCM), (Haug, 2005).

Le constat de départ était le suivant :

- un réseau de 10 000 km de chaussées pavées, dont 4 600 km nécessitant un épandage régulier d'abrasifs;
- 165 000 tonnes de sables et de débris de roc utilisées chaque année en matériaux abrasifs pour les besoins de l'entretien hivernal;
- 115 000 tonnes (70%) d'abrasifs récupérées par les opérations de balayage durant le printemps;
- seulement 25% de ces résidus récupérés sont réutilisés en mélange avec d'autres nouveaux sables;
- plus de 86 000 tonnes mises automatiquement à la décharge ou stockées chaque année car contaminées aux sels, aux hydrocarbures, aux fines, ainsi qu'aux déchets divers (City of Edmonton, 2005).

De plus, la caractérisation des résidus a montré une valeur de la conductivité électrique (EC) élevée et un taux d'absorption de sodium (SAR) dépassant les limites de « Salt Contamination Assessment and Remediation Guidelines », ce qui a motivé la décision de l'enfouissement dans des décharges régulières de Classe II. Les opérations d'enfouissement engendrent des problèmes environnementaux importants en raison des vastes espaces occupés, de la perte d'une ressource non renouvelable, des coûts importants liés aux droits de disposer les résidus dans les centres d'enfouissement et enfin, des coûts des matériaux neufs réutilisés chaque année (City of Edmonton, 2005).

Sur la base de ce constat, la ville d'Edmonton a entrepris de développer une solution pratique pour pallier aux difficultés causées par les résidus de balayage. L'objectif principal de cette étude était de trouver une alternative pouvant optimiser les coûts et réduire les impacts sur l'environnement de ces matériaux (Haug, 2005).

La ville d'Edmonton disposait d'une base de données de vingt ans sur la qualité des sables utilisés en entretien hivernal et des résidus de balayage du printemps. Cela a constitué une banque d'informations qui a permis de bien cerner les propriétés des résidus de balayage (granulométrie, caractéristiques des particules, etc.) ainsi que leur contamination aux hydrocarbures, métaux, particules fines, feuilles, herbes…etc. Les analyses de ces données indiquaient que plus de 80% de ces matériaux étaient potentiellement recyclables (Haug, 2005).

Deux options ont été initialement envisagées : le processus de recyclage à sec et le procédé de recyclage par lavage. Le premier a été rejeté en raison des coûts des équipements nécessaires ainsi que de l'impact de l'opération sur la qualité de l'air. Le second procédé, qui a été finalement retenu, utilise différentes technologies développées par les industries des agrégats, du béton et de la pétrochimie. La Figure 2.15 montre le processus de prise de décision relative à la gestion des abrasifs de la ville d'Edmonton.

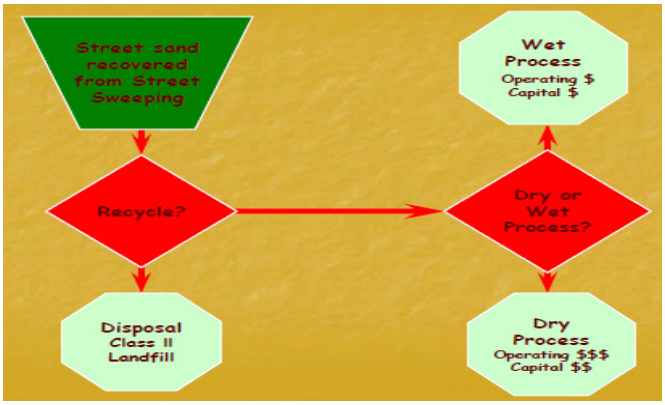


Figure 2.15 Processus de prise de décision pour les options de recyclage des résidus de balayage
Tirée de Haug (2005)

Quatre phases ont été développées pour le recyclage des résidus de balayage :

Phase 1 : Enlèvement des déchets

Les résidus de balayage sont placés dans un entonnoir d'alimentation qui va les disposer sur un tamis vibrant. Ils sont criblés et les particules > 10 mm sont enlevées. Plus de 6 900 tonnes de matières sont ainsi retirées des résidus et sont acheminés vers la production de granulats recyclés (City of Edmonton, 2005).



Figure 2.16 Enlèvement des gros granulats et des particules fines
Tirée de Haug (2005, p. 3)

Phase 2 : Lavage des matériaux

Le matériau restant de la phase 1 est acheminé vers un séparateur de fines. C'est un dispositif de rotation et de lavage. Les sables restants sont ensuite séparés par gravité et par écoulement vers le centre du point de rejet pour ensuite subir une déshydratation et un séchage supplémentaire. L'eau utilisée dans le processus de lavage provient soit d'un réservoir, soit d'un étang.

Phase 3 : Traitement des fines

Les fines de moins de 300 microns sont retirées par hydrocyclonage. Elles sont ensuite dirigées vers un traitement propre à ce type de matières. L'eau est rejetée dans des bassins de décantation.

Phase 4 : Essorage et déshydratation du sable propre

Le sable récupéré lors des phases précédentes, étant complètement saturé d'eau, est d'abord soumis à un écran de déshydratation afin de réduire son humidité à 10%. Il est ensuite empilé pour finir de sécher à l'air libre et par gravité. Le sable est acheminé 60 jours après, vers les stocks de la ville d'Edmonton, pour une réutilisation dans les rues (City of Edmonton, 2005).

2.9 Synthèse

La recherche bibliographique a permis de mieux saisir la problématique que pose la gestion des abrasifs pour les administrations routières.

L'état de l'art rapporte que les administrations pourraient récupérer 70% des abrasifs épandus. Cela représente quelques 700 000 tonnes annuellement pour le réseau du MTQ uniquement. Au Québec, les abrasifs récupérés au printemps ne sont catégorisés dans aucune norme à proprement dit. Les différents règlements et normes en vigueur ne les citent à aucun moment en termes clairs. Ils sont le plus souvent assimilés à des matières résiduelles ou des résidus de balayage. Leur sort actuellement est principalement l'enfouissement. Dans une moindre mesure, ils sont utilisés comme matériaux de recouvrement journalier, ce qui est une forme de valorisation en soi.

Les abrasifs sont des matériaux qui, après avoir servi pendant un hiver comme agents anti dérapant, en augmentant la rugosité de la chaussée, ont subi une transformation de leurs caractéristiques. Ces modifications concernent essentiellement la contamination par des

hydrocarbures pétroliers et des métaux. Ils sont également, du fait du mode d'enlèvement actuellement employé, en l'occurrence le balayage mécanique, mélangés à toutes sortes de débris, d'origine organique, ainsi que des poussières en bord des voies de circulation.

Sur le plan environnemental, la revue documentaire a mis en valeur une prédominance des hydrocarbures et certains métaux comme contaminants. Les sources potentielles de contamination sont cependant nombreuses et ceci explique la différence des teneurs relevées à différents endroits. La nature de la roche mère, l'environnement d'exposition, principalement le DJMA des routes, la topographie, la présence ou non de courbes ou de dénivelés, de zones de freinage ou bien encore de glissières de sécurité sont autant de facteurs qui peuvent influer sur la nature des contaminants et le taux de contamination.

L'expérience du Colorado a montré que les fractions < 0.85 mm ont un TRPH plus élevé que les fractions > 0.85 mm. Les hydrocarbures semblent fixer principalement les particules fines. Cependant, leur tentative de réduire le taux d'hydrocarbures à un seuil acceptable par la règlementation, n'a pas été concluante. Le potentiel de réutilisation demeurait toutefois possible.

Cette recherche bibliographique a permis de saisir les mécanismes de contamination qui interagissent avec le milieu routier. Les abrasifs, faisant partie de ce milieu, étant donné qu'ils sont présents sur la chaussée plusieurs mois par an, subissent les mêmes phénomènes que tous les matériaux qui sont à la surface de la chaussée, avec cette particularité qu'ils peuvent être en mouvement et par conséquent, véhiculer certains contaminants.

La recherche bibliographique a révélé également la problématique que soulèvent les fines, qu'elles soient produites ou accumulées par les abrasifs. Leur taux pose un sérieux problème de santé publique. La caractérisation des abrasifs montre un taux de fines qu'il est nécessaire d'éliminer ou de réduire dans une perspective de réutilisation des abrasifs.

Cette recherche bibliographique a également permis de mettre en valeur la technique de l'hydrocyclonnage pour enlever les particules fines. De tous les procédés de décontaminations vus dans ce chapitre, l'hydrocyclonnage parait le mieux adapté pour nettoyer les abrasifs et réduire leurs taux de fines. C'est un matériel peu dispendieux, qui ne nécessite pas de moyens technologiques ou chimiques particuliers. Ce matériel peut être couplé à un tamiseur dans toutes les carrières et sablières.

Les abrasifs récupérés par balayage ne sont pas des matières dangereuses au sens de la *Loi sur la qualité de l'environnement,* ni des sols contaminés. Ce sont des matériaux issus d'une roche mère, ressource non renouvelable. Cependant, cette recherche documentaire a montré que toute réutilisation potentielle des abrasifs dépendait de la capacité des administrations à nettoyer efficacement les résidus de balayage ramassés au printemps, en vue de récupérer les granulats d'abrasifs épandus quelques mois auparavant. Il est clair que toute réutilisation potentielle des abrasifs dépend de leur performance. Ils doivent avoir les caractéristiques physiques des matériaux qu'ils remplaceront. Ils doivent également répondre aux exigences environnementales.

Est-ce que l'abrasion des granulats d'abrasifs a maintenu une angularité acceptable? Pourront-ils répondre aux exigences géotechniques relatives aux normes en vigueur, à l'exemple des normes du BNQ, au Québec ? Le tamisage ou le lavage à l'eau suffit-il à les nettoyer et à les décontaminer ? Est-ce qu'une fraction granulométrique particulière adsorbe les métaux plus qu'une autre ? Est-ce que le trafic routier, le DJMH en l'occurrence, influe sur les taux de contamination ? Est-ce que leur contamination restreint leur possible réutilisation? Est-ce qu'en dépit de leur contamination, une réutilisation est possible ?

Ce sont autant de questionnements auxquels cette thèse se propose d'apporter des éléments de réponse pour améliorer les connaissances de l'évolution des propriétés des abrasifs en vue de les réutiliser.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE ET PROCESSUS EXPÉRIMENTAL

Ce chapitre présente les hypothèses de cette thèse, la description des phases expérimentales, le protocole d'échantillonnage ainsi que les protocoles d'essais pour une caractérisation exhaustive des abrasifs neufs, des résidus de balai et des résidus nettoyés.

3.1 Hypothèses et limites

Cette thèse traite des abrasifs récupérés par deux administrations routières au Québec durant les printemps 2012 et 2013. Il s'agit des abrasifs de la direction de l'Outaouais du MTQ et de la municipalité de Granby. Le choix des essais de caractérisation découlent de la similitude de contamination des échantillons des deux régions citées.

Les fines contenues dans les abrasifs récupérés peuvent provenir de l'abrasion des abrasifs, des poussières liées à l'environnement d'exposition des abrasifs ou bien encore d'autres sources extérieures. Cette thèse ne s'intéresse pas à l'origine de ces fines. Elle se consacre principalement à tenter de les réduire.

Les valeurs de caractérisation physique et chimique des abrasifs neufs échantillonnés représentent la référence pour l'évaluation de l'évolution du comportement physique et de la contamination des abrasifs.

En ce qui concerne la terminologie, les abrasifs récupérés sont souvent désignés par des appellations tels des « résidus de balai », des « résidus de ramassage » ou bien encore des « matières résiduelles ». Cette multiple disparité est entretenue par le fait que le ramassage par les balais mécaniques demeure le moyen le plus utilisé par les administrations routières. Il va de soi que le balai récupère les abrasifs certes, mais également toutes sortes de déchets. Il convient donc de faire la distinction entre la roche brute (granulats d'abrasifs) et les déchets divers qui s'y rajoutent durant l'hiver.

À ce titre, une attention particulière sera portée à la terminologie adoptée pour les abrasifs dans cette thèse. Il faudra donc bien distinguer l'objectif qui est de réutiliser les abrasifs et non les résidus de balais, matériaux totalement différents. Bien que les abrasifs ne soient pas considérés comme des sols, cette thèse s'appuie sur le « guide d'échantillonnage à des fins d'analyse environnementales – échantillonnage des sols ». La même hypothèse est émise pour évaluer la contamination des abrasifs selon la *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés.*

Enfin, le contexte, l'usage ainsi que les sources de contamination potentielle offrent une similitude avec les enrobés issus des travaux de construction et de démolition. Les « lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique et d'asphalte issus des travaux de construction et de démolition et des résidus du secteur de la pierre de taille », appelées lignes directrices dans ce document, pourraient ainsi offrir un cadre légal pour la réutilisation des abrasifs. Les abrasifs sont en effet, épandus sur la surface des chaussées qu'ils ne quitteront pratiquement plus jusqu'à leur ramassage. L'environnement dans lequel évoluent les abrasifs pendant leur exposition aux contaminants est similaire à l'environnement des chaussées.

3.2 Description des phases d'expérimentation

Les phases des essais sont les suivantes :

Phase 1 : Évaluation chimique des abrasifs bruts avant et après un cycle hivernal: Cette phase permet de comprendre les mécanismes de contamination des abrasifs exposés pendant un cycle hivernal. Le but est d'améliorer la connaissance du mode de contamination, de la nature des principaux contaminants, du degré de leur contamination ainsi que du rapport entre la contamination et le trafic routier.

Cette phase permet également, à travers un fractionnement des résidus d'abrasifs, d'étudier la répartition des contaminants dans les différentes fractions granulométriques des résidus et de mettre en valeur les fractions les plus exposées à une contamination par les métaux lourds.

L'enjeu de cette procédure est de statuer sur la faisabilité d'une décontamination à l'aide d'un tamisage à sec par isolation d'une fraction déterminée.

Phase 2 : Évaluation physique du comportement des abrasifs avant et après un cycle hivernal : Cette phase sert à comparer les propriétés physiques des granulats avant leur épandage et après leur ramassage au printemps. Elle renseigne sur la performance des granulats à l'issue d'un épisode hivernal.

Phase 3 : La troisième phase a pour objectif d'évaluer la contamination chimique des abrasifs sur un cycle de vie qui intègre un tamisage et un lavage par hydrocyclonnage. Elle permet d'estimer l'efficacité de l'action d'un tamisage et d'un lavage des résidus sur la réduction du taux de contamination.

Phase 4 : Le but de cette quatrième étape est d'évaluer les performances physiques et mécaniques des abrasifs nettoyés à l'hydrocyclonneur. L'évolution de leurs propriétés donne une idée sur leur comportement futur dans des conditions d'utilisation similaires. Il s'agit lors de cette phase de s'assurer que les abrasifs récupérés répondent aux exigences relatives aux matériaux fins des normes NQ 2560-114/2002 et NQ 2560-600/2002 du BNQ pour pouvoir être réutilisés.

Phase 5: Le but principal de cette étape est de valider les domaines d'application possibles pour les abrasifs nettoyés en considérant la règlementation en vigueur au Québec. Il s'agit de statuer sur la possibilité de réutiliser les matériaux comme abrasifs pour un second hiver et d'établir des formulations d'enrobés selon la méthode Marshall et la méthode LC, en intégrant les matériaux abrasifs récupérés et nettoyés, par substitution à la fraction 0/5 mm des granulats requise dans un mélange d'enrobés.

3.3 Protocole d'échantillonnage

Un plan d'échantillonnage vise à s'assurer que tous les matériaux dont il sera question au cours de cette recherche, soient représentatifs quantitativement et qualitativement de tous les

résidus et les abrasifs récupérés. Le plan comprend la méthode d'échantillonnage envisagée, le nombre d'échantillons requis ainsi que les outils et moyens utilisés.

Les résidus de balayage considérés dans cette étude proviennent de deux régions administratives du Québec : l'Outaouais et la Montérégie. Trois campagnes d'échantillonnage sont menées pour assurer cette représentativité dans ces deux administrations.

Les deux premières concernent les résidus de Gatineau. Elles sont réalisées durant les printemps de 2012 et 2103. En 2102, l'étude s'est concentrée sur la caractérisation des résidus de balai, pour comprendre l'évolution des propriétés mécaniques des abrasifs et leurs modes et degrés de contamination. La campagne menée en 2013, permet quant à elle, de laver et de tamiser les résidus, en vue de réutiliser les abrasifs.

La troisième campagne d'échantillonnage concerne les résidus de Granby. Elle est réalisée en été 2012.

Le plan d'échantillonnage établi suit les directives du guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales, principalement les cahiers 1, 5 et 8, édités par le centre d'expertise en analyses environnementales du Québec (CEAEQ, 2008).

La densité des échantillons est fonction du volume total des tas considérés. Chaque échantillon est composé de cinq sous échantillons combinés en proportions égales. Pour assurer l'intégrité des échantillons, les matériaux prélevés sont déposés dans des contenants en plastique neufs, fermés hermétiquement et clairement identifiés. Ils sont ensuite expédiés au laboratoire.

3.3.1 Provenance, ramassage et entreposage des échantillons

Abrasifs et résidus de Gatineau

Les abrasifs neufs sont entreposés au niveau du parc de la Direction de l'Outaouais. Les épandeuses viennent s'approvisionner de ce site là pour épandre les abrasifs en hiver, mais ce n'est pas toujours le cas. Les entrepreneurs fournissent parfois leurs propres abrasifs ; La Figure 3.1 montre les abrasifs neufs, non encore utilisés. Ils sont identifiés par les lettres « GTN ».



Figure 3.1 Entreposage d'abrasifs neufs à Gatineau

Les échantillons de 2012 des résidus ramassés par balayage sont prélevés quant à eux, sur le tas entreposé au niveau du centre d'entreposage provisoire de la direction de l'Outaouais du MTQ. L'entrepreneur chargé de procéder au balayage des chaussées et de récupérer les abrasifs au printemps a également le mandat de les transporter vers un centre d'enfouissement. Ces résidus sont entreposés provisoirement dans deux endroits couverts bien distincts. Le premier abrite les résidus provenant des sections de l'Autoroute 5 et l'Autoroute 50, ayant un débit journalier moyen annuel (DJMA) élevé. Ces échantillons sont désignés par les lettres « GTA ».

Les dimensions de ce tas ont été relevées au ruban et sont approximativement de 5.8 m (l), 9.7 m (L) et 2.45 m (hauteur moyenne). Cela représente un volume approximatif de 137 m³. La Figure 3.2 montre le tas abritant les résidus « GTA », identifiés plus haut.



Figure 3.2 Entreposage des résidus de balai à Gatineau

Le second endroit abrite les résidus provenant des sections de l'Autoroute 5 et de l'autoroute 50, des routes 307 et 105 et du pont Alonzo, dont le DJMA est moins élevé. Ces échantillons sont désignés par les lettres **« GTB ».** Les dimensions de ce tas sont 11.3 m (l), 5 m (L) et 1.70 m (hauteur moyenne), ce qui représente un volume approximatif de 96 m³. Ce chiffre sert à déterminer le nombre d'échantillons nécessaire pour une caractérisation. La procédure est décrite dans le Paragraphe 3.3.3.

En 2013, L'entrepreneur en charge du balayage des résidus de Gatineau a acheminé une partie des résidus, soit quelques 100 tonnes, directement vers une sablière de la région de Bromont afin d'être lavée selon le procédé d'hydrocyclonage. Les matériaux abrasifs récupérés sont échantillonnés au cours du mois de juillet 2013. Les échantillons des résidus non lavés sont prélevés sur le tas entreposé au niveau de la sablière tel qu'illustré par la Figure 3.3. Ils sont identifiés par les lettres « GTD »



Figure 3.3 Prélèvement des échantillons de résidus non lavés sur le Site de Bromont

Abrasifs et résidus de Granby

Les matériaux abrasifs récupérés, par balayage, par la direction des travaux publics de Granby sont échantillonnés au cours du mois d'aout 2012, de façon à offrir une représentativité adéquate des divers abrasifs récupérés. Cette démarche a respecté un plan d'échantillonnage établi à cette fin, incluant le nombre d'échantillons requis ainsi que les outils et les moyens utilisés.

Les échantillons sont prélevés sur le tas entreposé au niveau du garage municipal de la ville de Granby. La Figure 3.4 montre le tas abritant les résidus provenant du balayage de rue. Les échantillons analysés sont prélevés à cet endroit.



Figure 3.4 Centre d'entreposage des résidus de balayage au garage municipal de Granby

3.3.2 Échantillonnage des abrasifs neufs

À Gatineau, les abrasifs neufs sont entreposés au parc de la Direction Territoriale de l'Outaouais du MTQ. Les prélèvements des échantillons sont réalisés à cet endroit en 2012. Le même matériau a été utilisé l'année suivante, soit en 2013. Les caractéristiques des abrasifs neufs servent de référence pour estimer l'évolution des paramètres de contamination et de dégradation des abrasifs. Ces échantillons sont identifiés par les lettres « GTN ».

Pour la région de la Montérégie, la ville de Granby entrepose les abrasifs neufs au niveau du garage municipal. Les échantillons sont prélevés à cet endroit. Ils sont identifiés par les lettres « GRN »

3.3.3 Échantillonnage des résidus ramassés bruts

Résidus de Gatineau

- Campagne de 2012

La densité des échantillons prélevés est déterminée en considérant des sections de 30 m³. Les sections ne présentaient pas d'indice d'hétérogénéité de contamination, à l'œil nu. Chaque section est échantillonnée à l'aide d'un composé de cinq sous-échantillons combinés en proportions égales.

Une approche aléatoire de type systématique est adoptée pour prélever les échantillons. Un premier point d'enlèvement est choisi aléatoirement. Une grille est par la suite dessinée en surface des deux tas de résidus, de sorte à établir un maillage de type carré. La cueillette des échantillons est effectuée au centre de ces mailles. Un trou d'un mètre de diamètre est creusé. Les parois sont stabilisées auparavant pour éviter que les sols de surface ne retombent dans le fond. Les échantillons sont, par la suite, prélevés sur les parois.

Pour les besoins de toutes les analyses envisagées, une quantité de 40 kg par échantillon est prélevée. Huit échantillons sont concernés. Cinq du tas « GTA » et trois du tas « GTB. Cela représente 320 kg de résidus prélevés et acheminés vers le laboratoire. Ces échantillons sont définis par les lettres « GTA1 », « GTA2 », « GTA3 », « GTA4 », « GTA5 », « GTB1 », « GTB2 » et « GTB3 ». Le tableau 3.1 résume le programme d'échantillonnage élaboré.

- Campagne de 2013

Les échantillons des résidus non lavés, acheminés vers un site de lavage de la région de Bromont, tel que présenté au Paragraphe 3.3.1, sont prélevés sur le tas entreposé au

niveau de la sablière. La Figure 3.5 montre ces échantillons. Ils sont identifiés par les lettres « **GTD** ».

La densité des échantillons est fonction du volume total du tas considéré. Elle est déterminée en considérant des sections de 30 m^3. Les sections ne présentaient pas d'indice d'hétérogénéité de contamination à l'œil nu au moment du prélèvement. Deux (2) sections sont ainsi considérées.

Pour les besoins de la caractérisation chimique et physique des résidus, chaque échantillon est divisé en cinq sous échantillons combinés en proportions égales. Les échantillons ainsi recueillis, représentant quelques 30 kg de résidus, sont acheminés directement au laboratoire

Ces caractéristiques servent de référence pour estimer l'évolution des paramètres de contamination et de dégradation des abrasifs après un cycle de tamisage et de lavage. Ces échantillons sont identifiés par les lettres « **GTD1**» et « **GTD2** ».



Figure 3.5 Prélèvement des échantillons de résidus non lavés sur le site de Bromont

Résidus de Granby

La même procédure est adoptée pour les échantillons de Granby. La cueillette des échantillons est effectuée au centre des mailles à des profondeurs différentes, en tenant compte de la stratigraphie du tas. La Figure 3.6 montre le plan d'échantillonnage adopté sur le site des résidus de balai de la ville de Granby.



Figure 3.6 Plan d'échantillonnage au centre d'entreposage provisoire du garage municipal de Granby

La difficulté d'accès rend nécessaire l'utilisation d'une pelle mécanique pour prélever les échantillons à différentes profondeurs, comme l'illustre la Figure 3.7



Figure 3.7 Prélèvement des échantillons à différentes profondeurs
au garage municipal de Granby

La densité des échantillons est fonction du volume total du tas considéré. Elle est déterminée en considérant des sections de 30 m^3. Les sections ne présentaient pas d'indice d'hétérogénéité de contamination à l'œil nu au moment du prélèvement. Quatorze (14) sections sont ainsi considérées.

Chaque échantillon est divisé en cinq sous échantillons combinés en proportions égales. Les échantillons ainsi recueillis, représentant quelques 420 kg de résidus, sont acheminés directement au laboratoire.

Ces échantillons sont identifiés par les lettres **« GRD »** et sont numérotés de 1 à 14. Une partie de ces résidus, soit près de 147 tonnes est acheminée vers le site de lavage de Bromont afin d'être tamisées et lavées selon le procédé d'hydrocyclonage. La Figure 3.8 montre le transport vers la sablière, des résidus échantillonnés devant être lavés.



Figure 3.8 Transport des résidus vers le site de lavage à partir du garage municipal de Granby

3.3.4 Échantillonnage des abrasifs tamisés et lavés

Des tentatives de nettoyage des résidus sont entreprises au laboratoire. Ces essais se sont avérés très laborieux, tant les fines et les boues collées aux granulats d'abrasifs n'arrivaient pas à s'en détacher malgré un tamisage à sec avec une table vibrante et un lavage à grande eau. Seule une action dynamique énergique paraissait être efficace pour détacher les granulats de ces particules.

Lavage et tamisage par hydrocyclonnage

Cette étape consiste à soumettre les résidus à un lavage et à un tamisage par hydrocyclonneur. Ce procédé décrit dans le Paragraphe 2.6.4, est largement utilisé en Europe pour le lavage et la valorisation des sables. Il permet d'éliminer la fraction < 63 µm par

hydrocyclonnage et la fraction grossière par tamisage. Cette technique offre l'avantage d'extraire les matières de résidus et ainsi d'isoler les granulats abrasifs bruts.

La technique est basée sur le principe d'une alimentation tangentielle en créant un vortex. Une sousverse, en bas de la cuve, permet de récupérer les éléments grossiers du matériau. Une surverse située en haut de la cuve permet par effet du vortex, de récupérer les particules fines < 63 µm. Cette opération se fait sous l'action de la pression de l'eau, de la géométrie du cyclone et du diamètre des buses. L'eau utilisée suit un circuit fermé la menant tout d'abord vers des sites de décantation.

Au terme de cette phase, les échantillons recueillis font l'objet d'une caractérisation physique et chimique pour évaluer d'une part l'efficacité de la décontamination par cette technique et d'autre part estimer le pourcentage de matière brute récupérée.

La sablière dispose de bassins de décantation pour les particules fines récupérées et l'eau qui y est utilisée suit un circuit fermé, minimisant ainsi, l'impact sur l'environnement. Les fines récupérées à l'issue de ce procédé sont gérées comme des boues de décantation suivant la règlementation en vigueur.

La Figure 3.9 montre l'hydrocycloneur utilisé pour les besoins du lavage et du tamisage des abrasifs.



Figure 3.9 Lavage et tamisage des abrasifs au site de Bromont

Résidus de Gatineau

Un volume de 67 m^3 de résidus est récupéré après avoir subi un cycle de tamisage et de lavage par hydrocyclonnage. Deux échantillons représentant quelques 100 kg de matériaux lavés, sont prélevés et acheminés directement au laboratoire. Les échantillons sont identifiés par les lettres « **GTL1 » et « GTL2** ». La Figure 3.10 montre le tas de résidus ayant subi un cycle de tamisage et de lavage à l'hydrocyclonnage. Les échantillons lavés sont prélevés à cet endroit après un temps de séchage de sept jours. Le Tableau 3.1 résume le programme d'échantillonnage adopté.



Figure 3.10 Abrasifs tamisés et lavés au site de Bromont

Résidus de Granby

Quatre échantillons représentant quelques 100 kg de matériaux lavés, sont prélevés et acheminés directement au laboratoire. Les échantillons sont identifiés par les lettres « **GRL** » et sont numérotés de 1 à 4.

3.3.5 Identification des échantillons

Afin d'assurer l'intégrité des échantillons, les matériaux prélevés et destinés aux analyses, sont déposés dans des contenants en plastique neufs, fermés hermétiquement et clairement identifiés, puis expédiés aux laboratoires. Pour les résidus destinés au lavage, un endroit leur est spécialement aménagé au niveau de la sablière. Il est nettoyé afin de ne pas mélanger les résidus avec les autres matériaux disposés sur le site.

Instruments d'échantillonnage : les instruments utilisés pour les besoins d'échantillonnage sont une pelle, une truelle en PVC, des contenants en plastique neufs, des contenants en verre

de 500 ml, des étiquettes, des formulaires, une glacière, des contenants réfrigérants, des chiffons, une brosse et un ruban à mesurer.

Le Tableau 3.1 récapitule le programme d'échantillonnage entrepris lors des trois campagnes de cette thèse, incluant les numéros d'identification des échantillons, leur provenance, leurs caractéristiques et les dates de leurs prélèvements.

Tableau 3.1 Protocole d'échantillonnage des abrasifs de Gatineau et de Granby

N° de l'échantillon	Provenance	Caractéristiques	Quantités	Point de prélèvement	Date de prélèvement
GTN	Gatineau	Abrasifs neufs	40 kg	C.S de Gatineau	13.06.2012
GTA1 à GTA5	Gatineau, Aut5, Aut 50 DJMA élevé	Résidus de balai	100 kg	Site d'entreposage, Gatineau	13.06.2012
GTB1 à GTB3	Gatineau, Aut5, Aut 50, 307 105	Résidus de balai	100 kg	Site d'entreposage, Gatineau	13.06.2012
GTD1 GTD2	Gatineau	Résidus de balai	40 kg	Site de lavage, Bromont	05.07.2013
GTL1 GTL2	Gatineau	Résidus tamisés et lavés	100 kg	Site de lavage, Bromont	12.07.2013
GRN	Granby	Abrasifs neufs	40 kg	Garage municipal, Granby	14.08.2012 15.03.2013
GRD1 À GRD14	Granby	Résidus de balai	420 kg	Garage municipal, Granby	14.08.2012
GRL1 à GRL4	Granby	Résidus tamisés et lavés	100 kg	Site de lavage, Bromont	03.10.2012 19.11.2012

3.3.6 Préparation et fractionnement des échantillons

Les échantillons ayant subi un fractionnement proviennent de résidus de Gatineau de 2012. L'objectif recherché à travers le fractionnement est de procéder à une évaluation exhaustive de la concentration en métaux de toutes les composantes granulométriques des résidus. Cette étape inclut la réduction et le fractionnement des échantillons en sous-classes granulométriques pour étudier le comportement et la contamination de chaque fraction granulométrique.

Les échantillons sont d'abord réduits en laboratoire selon la méthode d'essai LC 21-015 de manière à ce que la plus petite fraction obtenue soit représentative de l'échantillon prélevé. La méthode adoptée est le quartage.

Pour les besoins de tous les essais physiques et chimiques, une quantité réduite de 10 kg par échantillon est considérée. Un fractionnement en classes granulométriques est effectué en utilisant un tamiseur mécanique. Une fois les échantillons tamisés, ils sont réduits selon la méthode d'essai LC 21-015 en utilisant un séparateur mécanique, puis conditionnés, dans des contenants en plastique, dans un réfrigérateur à 4°C. Ils ont ensuite subi des essais sur les métaux. Pour les besoins de l'analyse granulométrique et de fractionnement par tamisage, neuf tamis de maille carré de 80 μm à 10 mm sont utilisés.

3.4 Protocole d'essais

Outre la « Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés », trois documents édités par le ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEFP, 2002), ont orienté cette thèse pour le choix des paramètres physiques, mécaniques et chimiques à considérer afin d'aboutir à une application possible des abrasifs récupérés.

Il s'agit du « guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction » (MDDEFP, 2002), des « lignes

directrices relatives à la gestion de béton, de brique et d'asphalte issus de travaux de construction et de démolition et des résidus du secteur de la pierre de taille » (MDDEFP, 2012) et des « lignes directrices sur la gestion des matières résiduelles et des sols contaminés traités par stabilisation et solidification » (St-Laurent et al., 2011)

Les paramètres analysés sont la granulométrie, la résistance, la forme des grains et la chimie des matériaux. Il est donc nécessaire de déterminer la teneur en contaminants (hydrocarbures, métaux, fines...) des matériaux prélevés pour évaluer leur contamination ainsi que le taux de chaque matière contaminante.

Les essais mécaniques servent à évaluer le comportement physique des abrasifs et l'évolution de leurs caractéristiques géotechniques durant un exercice hivernal. Les paramètres retenus pour établir un protocole d'essais sont ceux exigés dans les normes qui traitent les matériaux fins pour une utilisation dans les domaines routiers (BNQ, 2002).

3.4.1 Identification des essais de caractérisation physique des résidus

Les essais envisagés sont l'analyse granulométrique, l'essai de friabilité et le Micro-Deval pour apprécier la résistance des granulats, le coefficient d'écoulement pour estimer l'angularité.

Analyse granulométrique – Méthode LC 21-040

L'essai granulométrique est nécessaire pour déterminer la grandeur des grains et leur répartition dimensionnelle dans un matériau. Les courbes granulométriques qui en résultent permettent de visualiser la classe du matériau. La méthode exigée dans la norme LC 21-040 utilise les tamis suivants : 28 mm, 20 mm, 14 mm, 10 mm, 5 mm, 2,5 mm, 1,25 mm, 0,630 mm, 0,315 mm, 0,160 mm, 0,080 mm.

Les échantillons sont réduits selon la norme LC 21-015 puis séchés à l'étuve et refroidis jusqu'à température ambiante. La comparaison des courbes granulométriques des résidus par

rapport à celles des abrasifs neufs permet de traduire le comportement des granulats et le niveau de leur altération pendant un épisode hivernal.

Coefficient d'écoulement- Méthode LC 21-075

La détermination du coefficient d'écoulement des granulats fins permet d'évaluer l'angularité des particules fines. Plus le coefficient est élevé, meilleure est l'angularité. Cet essai renseigne sur l'évolution de l'angularité des granulats pendant un épisode hivernal.

Essais de friabilité et Micro-Deval-Méthodes LC 21-080 et LC 21-101

Les résultats du Micro Deval renseignent sur la résistance à l'usure des matériaux. Cette usure est provoquée par le frottement des grains d'un même granulat entre eux sous l'effet d'une charge abrasive ; c'est l'usure par attrition. Plus la mesure du pourcentage d'usure est faible, plus le granulat est résistant.

L'essai de friabilité simule quant à lui, une action de fragmentation et d'écrasement des granulats en présence d'eau. Les billes d'acier, 10 à 100 fois plus grandes que les granulats, altèrent en particulier les gros granulats. Un grand coefficient indique la présence d'une frange importante de gros grains.

Ces deux essais montrent l'évolution des pourcentages d'usure et de friabilité des granulats soumis à un épisode hivernal et permettent ainsi d'évaluer leur résistance. Les valeurs obtenues serviront à classer les matériaux dans une catégorie définie par la norme NQ 2560-114/2002 (BNQ, 2002).

Colorimétrie – Méthode A23.2-7A

L'essai colorimétrique sert à apprécier la présence de matières organiques d'origine végétale ou animale dans les granulats fins. La présence en quantités importantes d'impuretés organiques pourrait restreindre les champs d'application des granulats.

Cet essai est réalisé sur deux types d'échantillons de résidus. Les premiers, bruts sont d'abord réduits par diviseur d'échantillons. Les seconds sont soumis à un cycle de tamisage et lavage à l'eau ordinaire après réduction par diviseur.

La méthode fait appel à un étalon de référence constitué d'un verre de couleurs aux fins de comparaisons. Une solution de 3% d'hydroxyde de sodium permet d'activer la réaction avec les matières organiques. Les résultats de l'essai sont une comparaison de la couleur de la lumière transmise à travers le liquide.

L'indice colorimétrique qui en résulte donne une indication sur l'évolution de la teneur en matières organiques des granulats après un tamisage et lavage.

3.4.2 Identification des essais d'évaluation de la contamination des résidus

Les documents de référence utilisés dans le cadre de cette recherche, cités dans la Paragraphe 3.4, recommandent de retenir les paramètres suivants en vue d'une caractérisation chimique des granulats : les métaux, les hydrocarbures pétroliers C_{10}-$C_{50,}$ les hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP et les essais de lixiviation.

La caractérisation chimique permet d'évaluer le degré de contamination des granulats abrasifs. Deux types d'analyses sont effectués : les totaux et les lixiviats.

Les analyses totales permettent de déterminer la nature et le niveau de contamination sur les matrices totales des échantillons. L'essai de lixiviation permet d'apprécier la mobilité des contaminants sous l'action d'un lessivage à l'eau.

En ce qui concerne les échantillons issus du fractionnement décrit dans le Paragraphe 3.3.6, la démarche permet de déterminer la répartition des contaminants dans les différentes fractions du matériau récupéré.

Analyse des hydrocarbures pétroliers C_{10}-C_{50}

Les analyses sont réalisées selon la méthode d'analyse MA.416-C_{10}-C_{50}1.0 (CEAEQ, 2009). Les résultats des concentrations en hydrocarbures pétroliers permettent de classer les granulats abrasifs selon les catégories établies par la politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés (MDDEP, 1998).

Analyse des hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP

Les analyses sont effectuées suivant la méthode d'analyse MA.400-HAP 1.1(CEAEQ, 2001). Les résultats des concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques permettent de classer les granulats abrasifs selon les catégories établies par la politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés (MDDEP, 1998).

Analyses sur les métaux et métalloïdes

Les analyses sont effectuées suivant la méthode d'analyse MA.200-Mét.1.2 (CEAEQ, 2010). Les résultats des concentrations en métaux permettent de classer les granulats abrasifs selon les catégories établies par la « Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés » (MDDEP, 1998).

Essais de lixiviation

Conformément aux exigences contenues dans les « Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille » concernant l'analyse des contaminants

inorganiques, trois essais de lixiviation sont obligatoires dans les lixiviats des paramètres excédant le critère A.

Ces essais sont cependant généralisés à tous les autres métaux. Les échantillons soumis à cette analyse proviennent des échantillons GTD1 et GTD2, identifiés dans le Paragraphe 3.3.3

Les essais de lixiviation sont réalisés pour déterminer la concentration des métaux susceptibles d'être lixiviés en contact avec l'eau (CTEU 9) et les pluies acides (SPLP, EPA 1312). L'essai (TCLP, EPA 1311) permet quant à lui d'évaluer la mobilité des espèces inorganiques. La méthode d'analyse utilisée est MA.100 – Lix. Com.1.1.

Dans le but d'évaluer le potentiel de lixiviation des matériaux abrasifs, trois essais de lixiviation sont effectués sur les résidus non lavés. Le Tableau 3.2 résume les essais réalisés pour la caractérisation des abrasifs.

Tableau 3.2 Types d'essais réalisés

Caractéristiques des abrasifs	**Type d'essais**	**Paramètres analysés**
Physiques	Granulométrie	Grosseur et pourcentage des grains
	Colorimétrie	Estimation des matières organiques
	Micro-Deval, friabilité, coefficient d'écoulement	Résistance aux chocs et à l'usure
Chimiques	Hydrocarbures pétroliers	Teneur en C_{10}-C_{50}
	Métaux par ICP	Teneur en métaux lourds
	Hydrocarbures polycycliques aromatiques	Teneur en HAP
	Essais de lixiviation	Lixiviation à l'eau Lixiviation pluies acides Lixiviation espèces inorganiques
	Conductivité hydraulique	Coefficient de perméabilité

CHAPITRE 4

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Ce chapitre décrit en premier les propriétés chimiques des résidus ramassés par balayage à Gatineau. Un fractionnement est réalisé sur ces échantillons pour évaluer la répartition des contaminants en fonction des classes granulométriques. Il traite en seconde partie la caractérisation physique de ces résidus pour estimer l'évolution de leurs propriétés intrinsèques et géotechniques à l'issue d'un cycle hivernal. Le troisième volet de ce chapitre s'intéresse à l'évolution des teneurs en contaminants dans les abrasifs nettoyés. Le quatrième évalue les propriétés physiques des abrasifs nettoyés. Enfin, le dernier est consacré aux perspectives de leur réutilisation avec notamment une application d'intégration des abrasifs nettoyés dans une formulation d'enrobés.

4.1 Évaluation de la contamination des abrasifs ramassés bruts

4.1.1 Caractérisation chimique des matériaux

Les échantillons soumis à cette caractérisation proviennent des tas GTN, GTA et GTB de Gatineau, identifiés dans le Paragraphe 3.3.2

Analyses des hydrocarbures pétroliers C_{10}-C_{50}

La méthode d'analyse utilisée est MA.416-C_{10}-C_{50} 1.0. Les résultats analytiques sont présentés à l'Annexe III. La Figure 4.1 montre les concentrations mesurées en hydrocarbures pétroliers C_{10}-C_{50} dans les échantillons analysés. Les résultats se situent dans la plage B-C de la « Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés ».

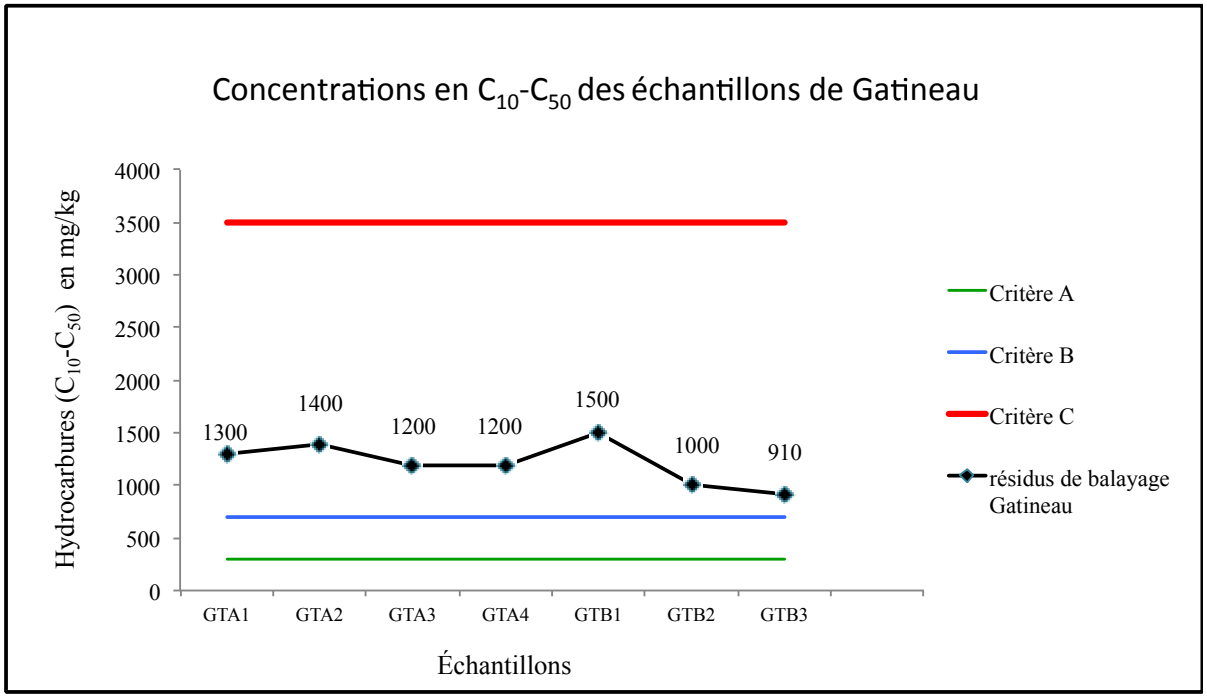


Figure 4.1 Diagramme des concentrations en hydrocarbures (C_{10}-C_{50}) des résidus de balayage

Analyse des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

La méthode d'analyse utilisée est MA 400 HAP 1.1. Les résultats analytiques sont présentés à l'annexe III. La lecture des résultats donne des concentrations inférieures au critère A à l'exception de l'échantillon GTB1 qui présente des concentrations en Benzo-fluoranthène, en fluoranthène, en naphtalène, en phénanthrène et en pyrène se situant dans la plage A-B et de l'échantillon GTA2 qui présente des concentrations en pyrène se situant dans la plage A-B.

Analyses des métaux et des métalloïdes

Deux modes opératoires sont considérés dans cette analyse :

- le premier mode consiste à déterminer la contamination aux métaux et métalloïdes sur une matrice solide, de la fraction totale 0/5 mm des échantillons prélevés dans les tas GTA et GTB identifiés dans le chapitre 3.3.3. Cette opération est confiée au laboratoire

privé accrédité Maxxam afin de pouvoir procéder à une comparaison de résultats, la liste de paramètres retenue étant la même pour les deux modes opératoires. Les paramètres d'analyses retenus sont les suivants : Argent (Ag), Arsenic(As), Baryum (Ba), Cadmium (Cd), Cobalt (Co), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Étain (Sn), Manganèse (Mn), Molybdène (Mo), Plomb (Pb), Nickel (Ni), Zinc (Zn) conformément à la PPSRTC;

- le second mode opératoire est exécuté au laboratoire STEPPE de l'ÉTS sur des échantillons issus du fractionnement par classe granulométrique des échantillons GTA et GTB, opération décrite dans le chapitre 3.3.6. Il est procédé à l'essai ICP pour chacune des fractions de 0/5 jusqu'à la fraction < 80 µm. Ce mode opératoire est établi afin de mettre en évidence les fractions qui fixaient le plus les contaminants. La démarche permet ainsi de déterminer la répartition des contaminants dans différentes fractions du matériau récupéré.

Afin de pouvoir effectuer une comparaison entre la teneur naturelle en métaux qui sont contenus dans la roche de constitution du matériau et celle obtenue après un cycle hivernal, l'échantillon neuf GTN est également analysé. Ce sera désormais la référence concernant l'état initial du matériau neuf.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans l'annexe III. Le Tableau 4.1 ci-dessous, est une synthèse des contaminants dont les teneurs sont au dessus du critère A de la PPSRTC.

Il en résulte que l'argent, le baryum, le cadmium, le cobalt, le chrome, le manganèse, le molybdène, le nickel ainsi que le plomb sont des métaux présents à des teneurs inférieures au seuil du critère A. La teneur en cuivre est dans la plage A-B pour les échantillons GTA3 et GTB1. La concentration en zinc se situe dans la plage A-B pour tous les échantillons à l'exception de l'échantillon GTB3, lequel présente une teneur inférieure au critère A.

Tableau 4.1 Récapitulatif des concentrations des échantillons en zinc et en cuivre

Norme MA-100-Lix.2.00	**Critères et normes**					**Échantillons**						
Métaux analysés	Unités	A	B	C	$RESC_1$	GTA 1	GTA 2	GTA 3	GTA 4	GTB 1	GTB 2	GTB 3
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2500	36	31	68	37	41	22	26
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1500	7500	150	150	210	120	180	140	85

1 : valeurs limites définies dans l'annexe I du Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés

La Figure 4.2 montre donc le taux de concentrations des échantillons en zinc et en cuivre obtenus à l'issue de l'analyse des échantillons effectuée par le laboratoire Maxxam.

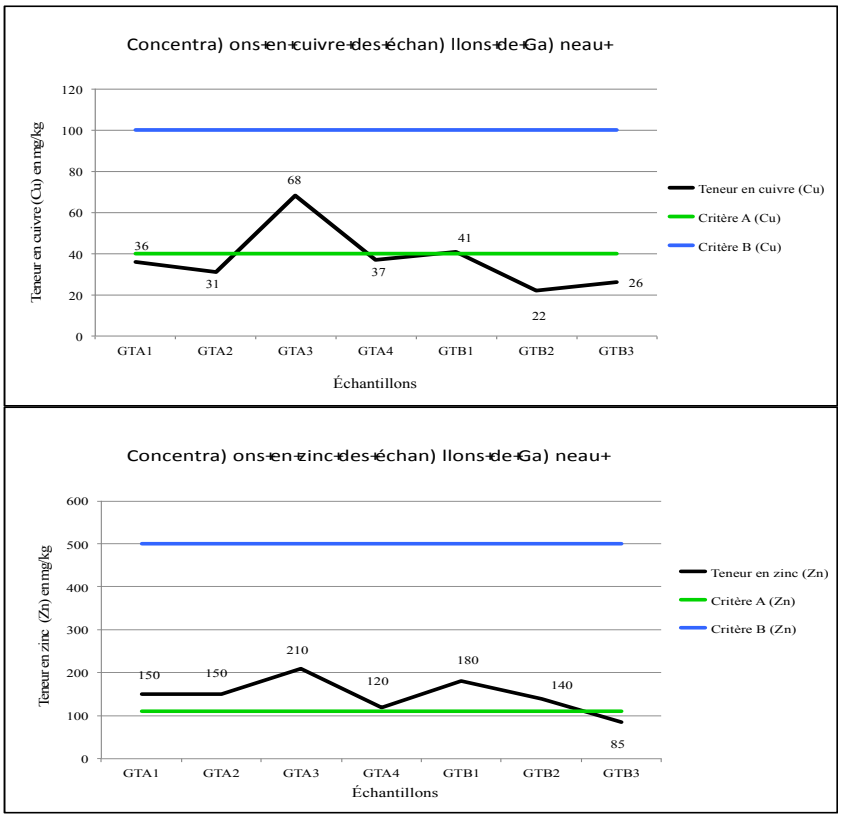


Figure 4.2 Concentrations en métaux (Cu, Zn)
des échantillons de Gatineau

Essai de lixiviation à l'eau

L'essai de lixiviation est réalisé au laboratoire STEPPE du département de génie de la construction de l'ETS. Cet essai sert à déterminer la concentration des métaux susceptibles d'être lixiviés en contact avec l'eau. Les échantillons soumis à cet essai proviennent de la matrice totale 0/5 mm des échantillons GTA, GTB et GTN. La méthode d'analyse utilisée est MA.100 – Lix. Com.1.1.

La détermination de la teneur en métaux est effectuée par la méthode de spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon selon les exigences de la méthode MA.200-Mét. 1.2.

Les résultats de l'essai présentés dans l'Annexe III montrent des concentrations en métaux du lixiviat en dessous des concentrations maximales d'un contaminant dans le lixiviat d'une matière solide, établies par le « Règlement sur les matières dangereuses » du MDDEFP. Il en résulte un faible potentiel de lixiviation des métaux contenus dans la matrice totale. L'Annexe VIII montre les valeurs maximales en regard des essais de lixiviation.

4.1.2 Répartition de la contamination dans les différentes fractions granulométriques

Les échantillons soumis à cette caractérisation proviennent des tas GTA, GTB et GTN de Gatineau, identifiés dans les sections 3.3.2, 3.3.3 et 3.3.6. La méthode MA.200-Mét. 1.2 est utilisée pour déterminer la teneur en métaux. Toutefois, certaines teneurs en métaux, tel que l'arsenic n'ont pu être relevées. Les résultats compilés de cet essai sont illustrés en Annexe III. Les résultats montrent que le cuivre et le zinc sont les deux métaux dont les concentrations dépassent le critère A et ce pratiquement pour tous les échantillons GTA, GTB et GTN analysés.

La Figures 4.3 montre les teneurs en cuivre des échantillons GTA comparativement à l'échantillon GTN ainsi que les teneurs des échantillons GTB.

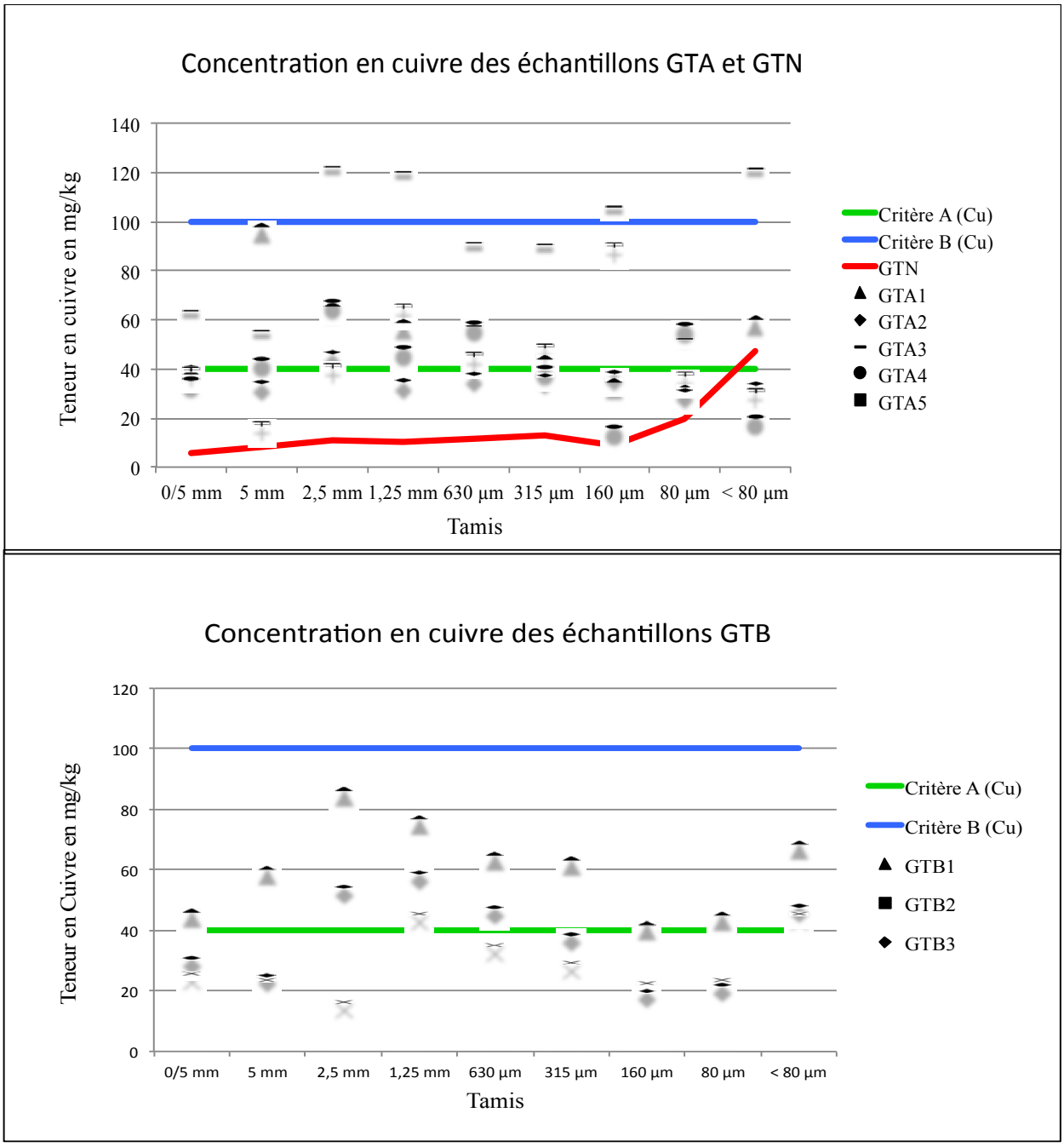


Figure 4.3 Concentrations en cuivre (Cu) des séries d'échantillons GTA, GTN et GTB

Les graphiques ci-dessus permettent de constater que les échantillons GTA se situent dans la plage A-B à l'exception de l'échantillon A3 qui est au dessus et se trouve dans la plage B-C. Les teneurs en cuivre des échantillons GTB sont situées quant à elles dans la plage A-B.

La figure 4.4 montre la concentration en zinc des échantillons GTA, comparativement à celle de l'échantillon GTN et celle des échantillons GTB.

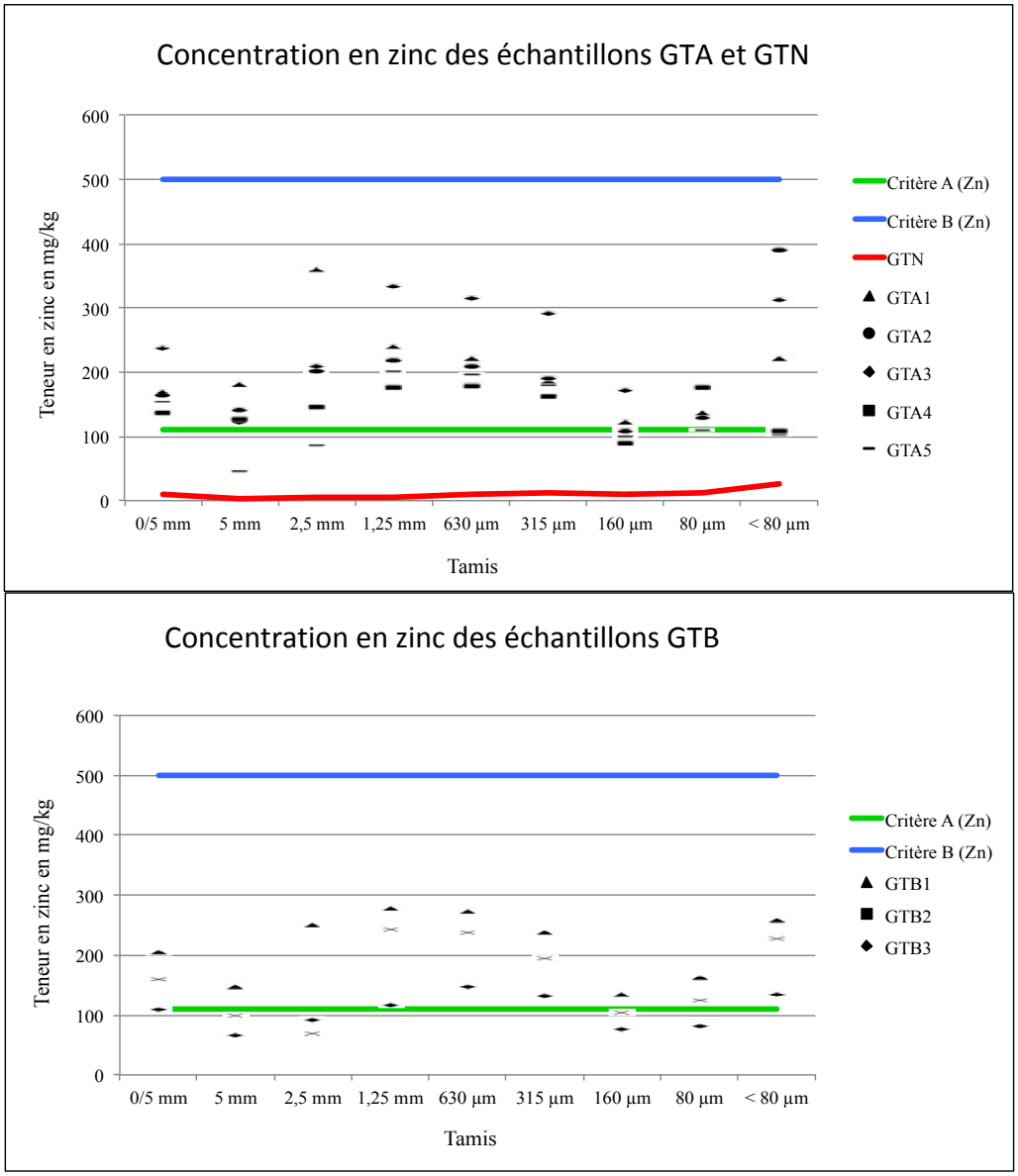


Figure 4.4 Concentrations en zinc (Zn) des séries d'échantillons GTA, GTN et GTB

Les Figures 4.5 et 4.6 montrent la répartition globale des teneurs en cuivre et en zinc dans les échantillons GTA fractionnés.

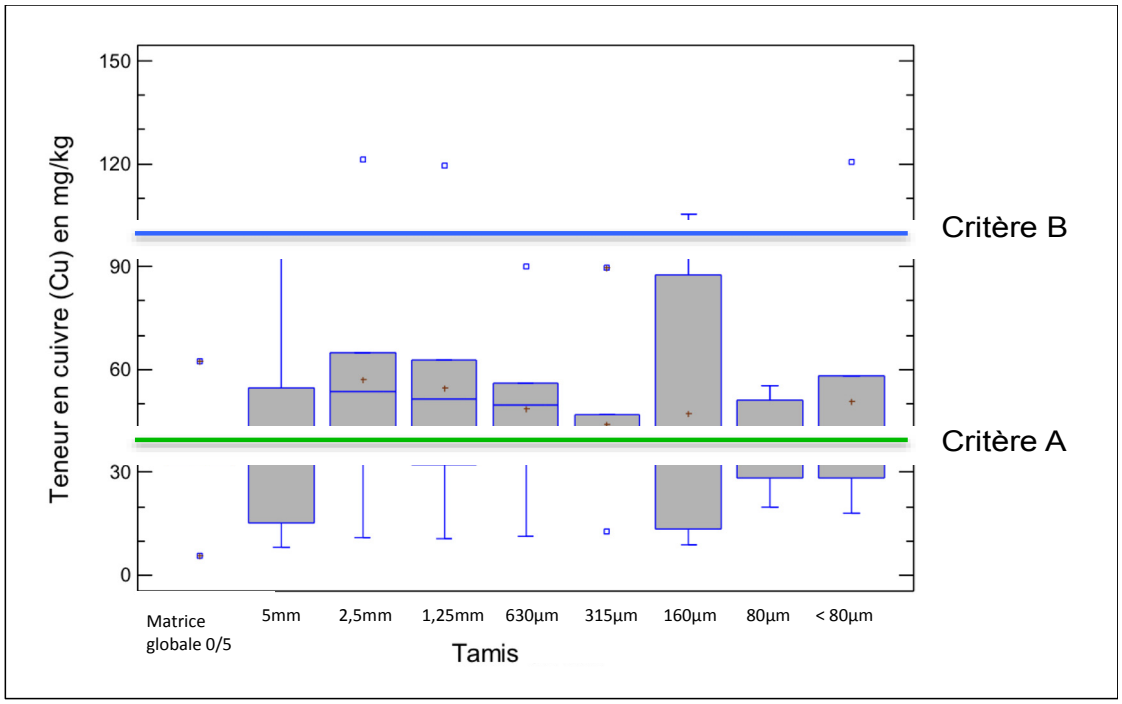


Figure 4.5 Répartition globale de la contamination des fractions granulaires en cuivre

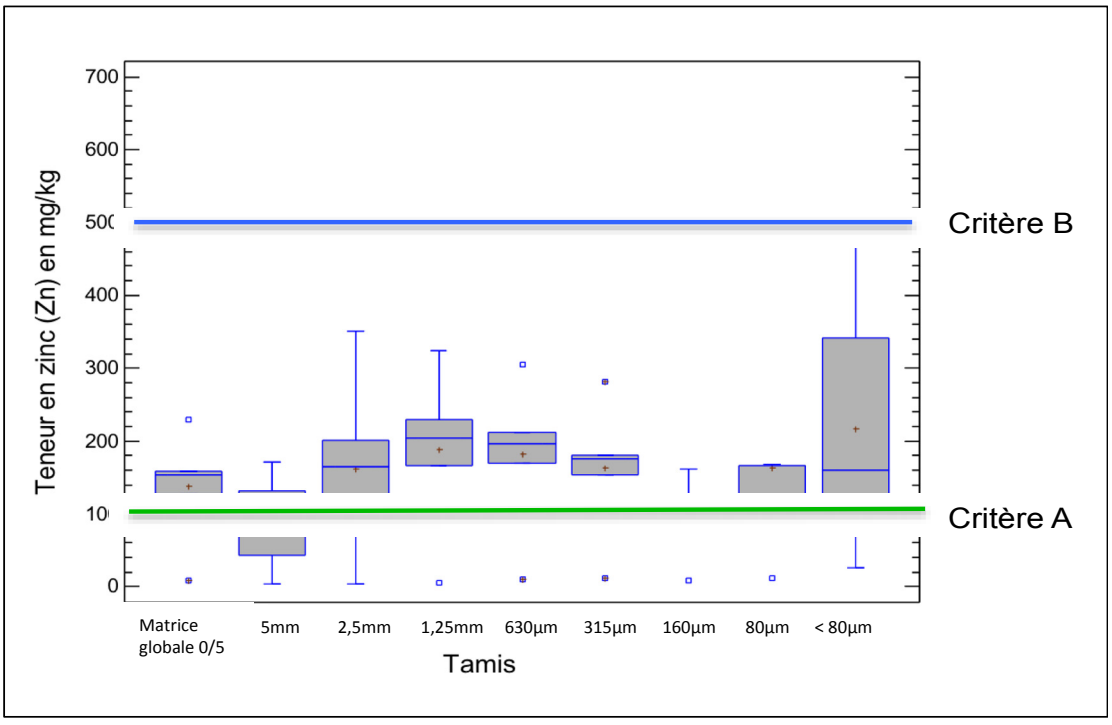


Figure 4.6 Répartition globale de la contamination des fractions granulaires en zinc

Il ressort cependant une teneur élevée de cuivre dans la fraction comprise entre 630 µm et 2,5 mm et la fraction < 80 µm. La même tendance semble s'appliquer pour le zinc.

La lecture des résultats de cette analyse par fractionnement présentés en Annexe III et sur les figures 4.5 et 4.6, montrent une nette fixation des métaux par deux fractions granulométriques bien identifiées: le fuseau 630 µm-2,5 mm et le fuseau de fines < 80 µm.

4.1.3 Analyse et discussion

Les résultats d'essais effectués sur les échantillons des résidus de balayage récupérés au printemps 2012, des tas GTA et GTB indiquent des concentrations en C_{10}-C_{50} supérieures à 300 mg/kg et inférieures à 3500 mg/kg. Ces valeurs permettent de les classer dans la catégorie B-C des critères génériques de la PPSRTC.

Leur teneur en C_{10}-C_{50}, étant supérieure à 700 mg/kg et inférieure à 3500 mg/kg, permet de les classer dans la catégorie 3 des « lignes directrices ».

Concernant les HAP, les résultats d'essais indiquent généralement des concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP inférieures au critère générique A. L'échantillon GTB1 présente quant à lui des concentrations en fluoranthène, naphtalène phénanthrène et en pyrène situées dans la plage A-B. Vu que seul un échantillon est dans cette dernière plage, il est possible de considérer qu'il s'agit d'un agglomérat isolé.

En ce qui concerne les métaux, l'évaluation de la contamination des résidus aux métaux et metalloïdes a été réalisée en effectuant deux modes opératoires.

Les résultats des deux modes opératoires se rejoignent et indiquent notamment, que les paramètres dont les teneurs sont supérieures au critère générique A, sont le cuivre et le zinc. Les autres métaux tels que le cadmium, le cobalt et l'argent ont des teneurs inférieures à la classe générique A, le plus souvent. Un cas de concentration élevée d'arsenic, dû

probablement à une contamination accidentelle au laboratoire, est considéré isolé et donc écarté.

Le second mode opératoire, en l'occurrence le fractionnement, permet de montrer le fort potentiel de fixation des métaux dans les fuseaux granulométrique 630 µm / 2,5 mm et 80 µm. Les résultats de ces essais montrent qu'une fraction grossière fixait le plus les métaux. Cela rejoint les conclusions déjà évoquées par Freyssinet (1998), selon lesquelles, les plus grandes concentrations en zinc se trouvaient dans les fractions supérieures à 1,25 mm (Freyssinet, 1998).

Globalement, il en ressort que les fractions comprises entre 2,5 mm et 630 µm ainsi que la fraction < 80 µm affichent des valeurs supérieures à celles des autres fractions granulométriques sans toutefois dépasser le critère B. Les résultats des deux essais ICP effectués avec des approches différentes montrent néanmoins un même degré de contamination des résidus aux métaux lourds. Ils permettent de classer l'ensemble des échantillons dans la plage générique A-B.

Par ailleurs, l'essai lixiviation à l'eau réalisé afin d'évaluer le potentiel de lixiviation des métaux contenus dans la matrice 0/5 mm a montré un potentiel de lixiviation faible.

Concernant l'évolution de la contamination en fonction du DJMH, les résultats montrent que les écarts entre les taux de contamination des échantillons du tas GTA provenant du balayage des sections des autoroutes 5 et 50 et de ceux du tas GTB, provenant de sections de routes dont le DJMA est moins élevé, ne sont pas importants. Il existe une probabilité que ces deux catégories d'échantillons aient été mélangées lors de l'opération d'entreposage au niveau du centre d'entreposage provisoire de Gatineau. De ce fait, à ce stade, l'étude ne peut pas tirer de conclusions quant à l'évolution de la contamination en fonction du DJMH.

En résumé, sur la base des résultats compilés des concentrations en métaux et en hydrocarbures pétroliers C_{10}-C_{50}, il est possible d'affirmer que les échantillons des

tas GTA et GTB des résidus de balayage récupérés, seront classés dans la catégorie 3 selon les « Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille ». Ils pourraient de ce fait être utilisés dans de nombreuses applications.

4.2 Évaluation des propriétés physiques et mécaniques des abrasifs ramassés bruts

Cette seconde phase expérimentale envisage d'évaluer les propriétés intrinsèques et géotechniques des résidus ramassés par balayage et de comparer les paramètres obtenus à ceux des abrasifs neufs. Cette comparaison permet de traduire le comportement des abrasifs après avoir subi un cycle hivernal.

4.2.1 Caractérisation physique des matériaux

Les paramètres retenus pour la caractérisation physique et mécanique des abrasifs répondent aux critères exigés dans les normes NQ 2560-114/2002 et NQ 2560-600/2002. Il s'agit notamment de l'analyse granulométrique, du coefficient d'écoulement, du pourcentage de friabilité, du pourcentage d'usure et de l'indice colorimétrique.

Les échantillons soumis à cette caractérisation proviennent des tas GTA, GTB, et GTN de Gatineau, identifiés dans le chapitre 3.3.2 et 3.3.3.

Analyse granulométrique - Méthode LC 21-040

L'essai granulométrique est nécessaire pour déterminer la grandeur des grains et leur répartition dimensionnelle dans le matériau. Les courbes granulométriques qui en résultent permettent de visualiser la classe du matériau. La méthode utilisée est celle exigée dans la norme LC 21-040. Les tamis utilisés sont les suivants : 28 mm, 20 mm, 14 mm, 10 mm, 5 mm, 2,5 mm, 1,250 mm, 0,630 mm, 0,315 mm, 0,160 mm, 0,080 mm. Les échantillons ont été réduits selon la norme LC 21-015 puis séchés à l'étuve et refroidis jusqu'à température ambiante.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont illustrés dans le Tableau 4.2 et dans l'Annexe IV.

Tableau 4.2 Récapitulatif des résultats granulométriques

Tamis (mm)	GTN1	GTA1	GTA2	GTA3	GTA4	GTA5	GTB1	GTB2	GTB3
28	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100
14	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100
5	84	98	98	95	95	98	95	98	96
2,50	22	88	86	80	80	85	84	89	78
1,250	10	80	72	68	66	74	71	79	62
0,630	7	61	51	48	47	56	49	65	45
0,315	4	36	29	28	27	31	23	36	23
0,160	3	16	14	14	14	15	11	15	11
0,080	1	5	5	6	6	6	4	5	4

Évolution des courbes granulométriques des abrasifs

La Figure 4.7 montre l'évolution de la granulométrie des abrasifs soumis à un épisode hivernal. L'échantillon GTN représente le matériau neuf avant utilisation.

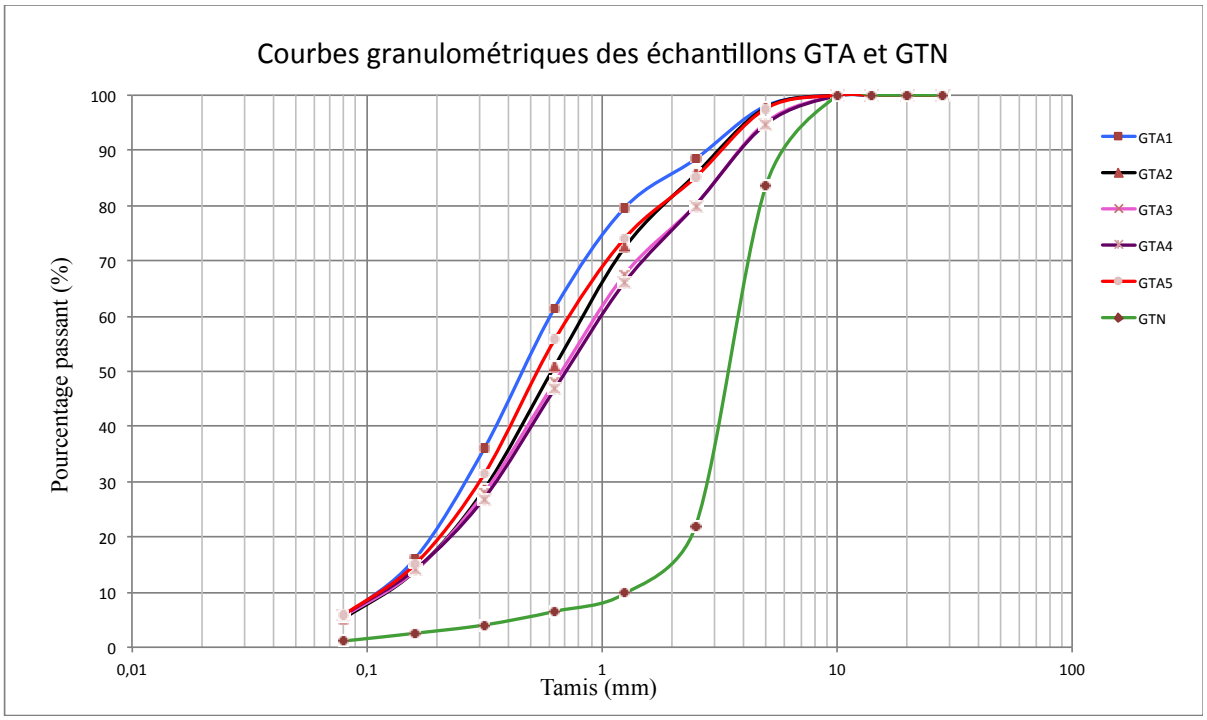


Figure 4.7 Courbes granulométriques des échantillons GTA et GTN

La superposition des courbes des échantillons GTA avec la courbe de l'échantillon GTN, montre clairement un relèvement des courbes GTA. La courbe de l'abrasif neuf montre une granulométrie restreinte avec seulement 1% de passant au tamis 80 µm et 22 % de passant au tamis 2,5 mm. Les courbes GTA affichent une augmentation de la fraction < 2,5 mm, passant de 22% à plus de 80%. De plus, les particules fines < 80 µm représentent 6% des échantillons, soit une augmentation de 5% de fines.

La Figure 4.8 illustre les courbes granulométriques des échantillons GTB. La même tendance de relèvement des courbes que les échantillons GTA se dessine. Cependant, la comparaison avec les échantillons GTN n'a pas été effectuée car leur origine n'est pas connue comme mentionné précédemment.

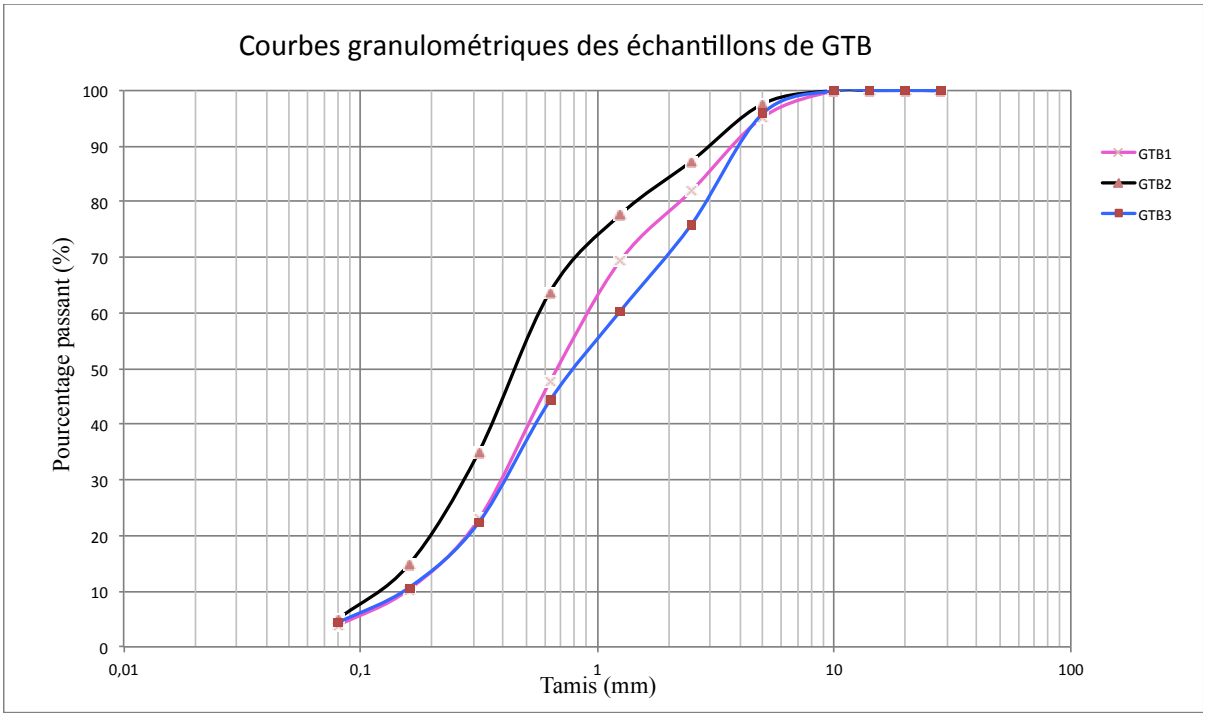


Figure 4.8 Courbes granulométriques des échantillons GTB

Coefficient d'écoulement – Méthode LC 21-075

La détermination du coefficient d'écoulement des granulats fins permet d'évaluer l'angularité des particules fines. Plus le coefficient est élevé, meilleure est l'angularité. L'essai sur l'échantillon GTN est effectué pour pouvoir évaluer le comportement des abrasifs issus des échantillons GTA. Les résultats de cet essai pour les échantillons de la série GTA, de la série GTB ainsi que l'échantillon GTN sont présentés dans le Tableau 4.3 et en Annexe IV

La Figure 4.9 montre l'évolution du coefficient d'écoulement des granulats fins des échantillons GTA et GTB. Il en résulte une diminution du coefficient d'écoulement et donc une perte d'angularité importante après seulement un cycle hivernal.

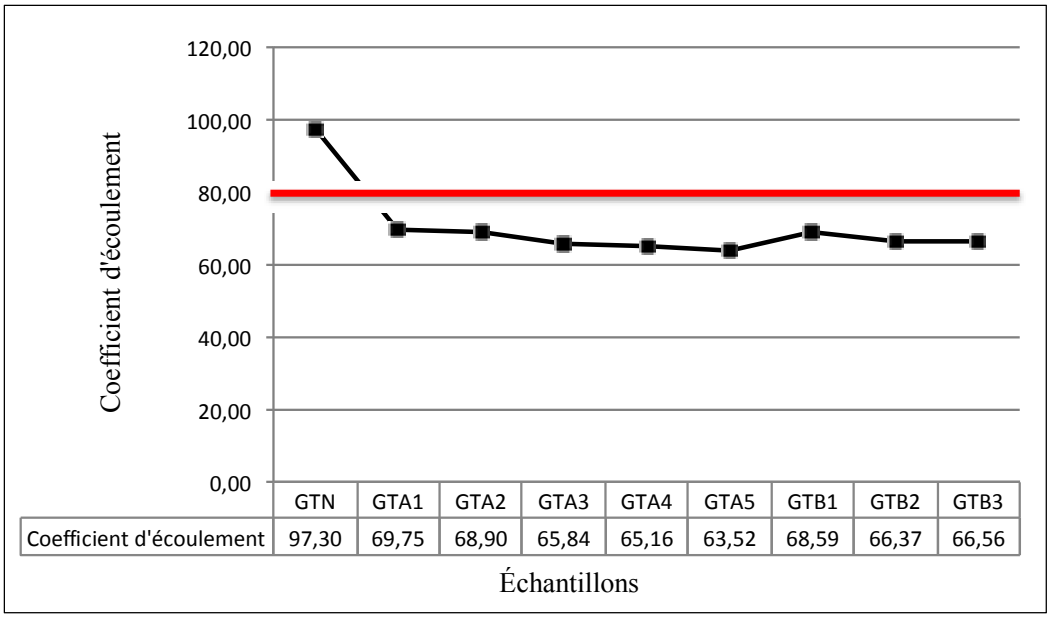


Figure 4.9 Résultats de l'essai d'écoulement des échantillons GTN, GTA et GTB

Essais de friabilité et Micro-Deval-Méthodes LC 21-080 et LC 21-101

Le Tableau 4.3 récapitule les résultats de ces deux essais ainsi que le coefficient d'écoulement.

Tableau 4.3 Récapitulatif des résultats de friabilité, du pourcentage d'usure et du coefficient d'écoulement

	GTN	**GTA1**	**GTA2**	**GTA3**	**GTA4**	**GTA5**	**GTB1**	**GTB2**	**GTB3**
Pourcentage d'usure	11,32	23,76	21,61	21,07	20,87	22,70	20,12	22,65	20,01
Friabilité	33,13	24,50	26,08	26,18	27,33	25,89	24,52	23,85	27,16
Coefficient d'écoulement	97,30	69,75	68,90	65,84	65,16	63,52	68,59	66,37	66,56

Les Figures 4.10 et 4.11 montrent l'évolution des pourcentages de friabilité et d'usure des échantillons GTA comparativement à l'abrasif neuf GTN. Les valeurs de Micro-Deval ont augmenté de quelque 10%. La résistance des granulats a donc diminué. Les valeurs obtenues permettent cependant de les classer dans la catégorie 1 des granulats fins selon la norme NQ 2560-114/2002 car elles ne dépassent pas 30% pour le Micro Deval et 40% pour la friabilité. Le Tableau 2.4 illustre le contenu de la classification des granulats selon la norme NQ 2560-114/2002.

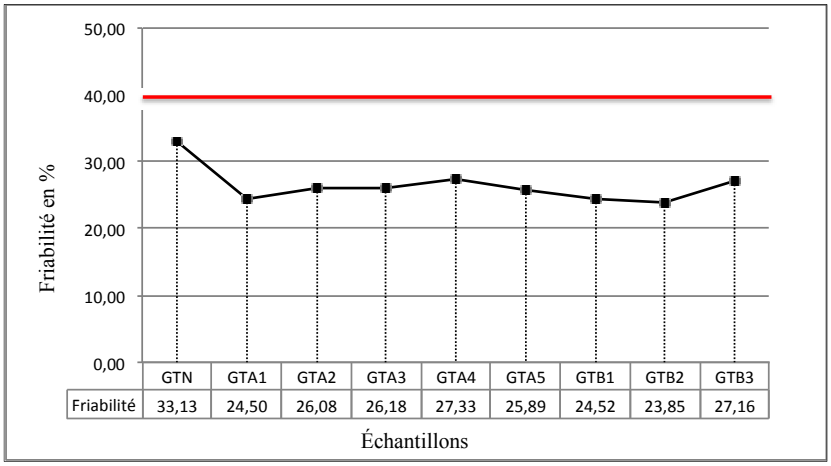


Figure 4.10 Courbes des résultats de friabilité des échantillons GTN, GTA et GTB

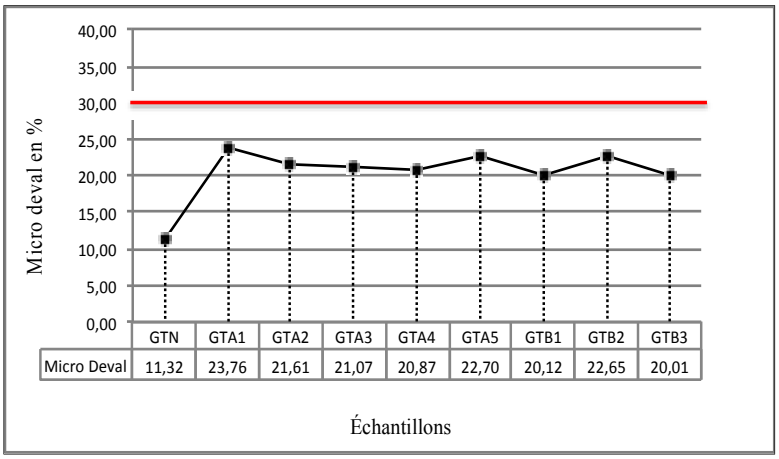


Figure 4.11 Courbes des résultats de Micro-Deval des échantillons GTN, GTA et GTB

Colorimétrie – Méthode A23.2-7A

Cet essai a été réalisé sur deux types d'échantillons. Les premiers, bruts sont d'abord réduits par diviseur d'échantillons. Les seconds sont soumis à un cycle de lavage au laboratoire, à l'eau ordinaire après réduction par diviseur.

La méthode fait appel à un étalon de référence constitué d'un verre de couleurs aux fins de comparaisons. Une solution d'hydroxyde de sodium (3%) permet d'activer la réaction avec les matières organiques. Les résultats de l'essai sont une comparaison de la couleur de la lumière transmise à travers le liquide. Les résultats sont illustrés dans le Tableau 4.4 et l'Annexe IV.

Ils montrent des indices de colorimétrie de 3 et 4 pour les échantillons GTB, indiquant une forte présence de matières organiques pour les échantillons non lavés. Ces valeurs retombent à 1 grâce à l'action du lavage. Ils montrent des indices de valeur qui permettent aux granulats une acceptabilité selon les exigences de la norme CSA A23.1 relative aux impuretés organiques.

Tableau 4.4 Récapitulatif des résultats d'essai de colorimétrie

	GTN	**GTA1**	**GTA2**	**GTA3**	**GTA4**	**GTA5**	**GTB1**	**GTB2**	**GTB3**
Indice colorimétrique avant lavage	1	3	2	2	3	3	4	3	3
Indice colorimétrique après lavage	1	1	1	1	1	1	1	1	1

4.2.2 Analyse et discussion

Les analyses effectuées dans ce chapitre ont permis de caractériser les propriétés des résidus issus du balayage. L'évolution de la répartition granulaire, du pourcentage d'usure, de la friabilité, du coefficient d'écoulement ainsi que de l'indice colorimétrique donne des

renseignements sur le comportement des granulats abrasifs soumis à des contraintes liées à l'environnement de la chaussée en période hivernale.

La comparaison entre les courbes granulométriques de la série d'échantillons GTA et la courbe granulométrique de l'échantillon de référence GTN, indique qu'il est possible de constater une abrasion des granulats provenant des résidus de balayage pendant l'épisode hivernal. Cette abrasion se traduit par un relèvement des courbes granulométriques. Le pourcentage de fines et de passants au tamis 2,5 mm est passé de 22 % pour l'échantillon GTN à 88 % pour les échantillons de la série GTA. Le taux de fines < 80 μm, est passé quant à lui de 1% à plus de 6%, soit une augmentation de 5 points de pourcentage de fines.

Toutefois, les valeurs obtenues lors des essais d'attrition au moyen de l'appareil Micro-Deval ainsi que le pourcentage de friabilité, renseignent sur la bonne résistance de ces granulats. En effet, La friabilité des échantillons de la série GTA se situe en dessous de 25 %. Ce sont des granulats qui peuvent être classés dans la catégorie 1 des granulats fins selon la norme NQ 2560-114-I/2002. Ils conservent donc toutes les caractéristiques de résistance même si elles ont évolué au cours de l'épisode hivernal.

Cependant, les résultats de la friabilité montrent que le matériau neuf a un coefficient plus élevé que les résidus, donc plus friable. L'essai de friabilité simule une action de fragmentation et d'écrasement en présence d'eau sous l'effet de billes d'acier beaucoup plus grandes que les granulats (10 à 100 fois). Cet essai semble altérer beaucoup plus les plus grosses particules dans le cas précis. L'abrasion des granulats lors de la période hivernale, a entrainé de ce fait, la formation de particules fines par attrition.

De plus, la concentration en matières organiques d'origine animale ou végétale, déterminée par méthode colorimétrique a indiqué des valeurs inférieures à 3. Après lavage et tamisage ces valeurs sont retombées à 1. Cela montre qu'un lavage à l'eau et un tamisage permettent de les rendre très propres, dans les conditions de laboratoire.

Le coefficient d'écoulement des échantillons GTA et GTB se situe dans la catégorie des coefficients moyens. Bien que cet essai ne mesure que les fractions < 2 mm, il renseigne toutefois sur la réduction de l'angularité des granulats. Ceci est le résultat de l'attrition pendant la période hivernale entre le granulat et la chaussée sous l'action des roues des véhicules. Les valeurs obtenues sont inférieures à 80, ce qui restreint a priori leur utilisation dans les enrobés à chaud, notamment dans le cas où la catégorie 1 est exigée, comme le stipule le tableau 3 de la norme NQ 2560-114-V/2002.

En résumé, les résidus échantillonnés affichent des valeurs de résistance intéressantes. Cependant, leur angularité et surtout leur taux de fines < 80 µm peuvent restreindre considérablement les voies de réutilisation.

4.3 Évaluation de la contamination des abrasifs nettoyés

4.3.1 Caractérisation chimique des matériaux

Cette troisième phase expérimentale a pour but d'évaluer la contribution du tamisage et du lavage dans le processus de décontamination des résidus issus du balayage. Il s'agit de vérifier si le nettoyage des résidus permet de réduire les taux d'hydrocarbures et des métaux contenus dans les matrices de résidus récupérés.

Les échantillons soumis à cette caractérisation proviennent des tas GTN, GTD et GTL de Gatineau, ainsi que des tas GRN, GRD et GRL de Granby, identifiés dans les chapitres 3.3.2, 3.3.3 et 3.3.4.

Il est utile de signaler que les teneurs de fond, qui représentent le critère générique « A » du MDDEFP pour les substances inorganiques, diffèrent d'une province géologique à une autre. Les teneurs relevées à Gatineau correspondent à des teneurs de fond de la province géologique « B », province des Basses-Terres du Saint-Laurent, tandis que celles relevées à Granby doivent correspondre aux teneurs de fond de la province géologique « A », province

des Appalaches. L'Annexe VII montre la carte géologique du Québec éditée par le ministère des Ressources Naturelles.

Analyses des hydrocarbures pétroliers C_{10}-C_{50}

Les résultats analytiques sont présentés à l'Annexe V. La Figure 4.12 illustre les concentrations en hydrocarbures C_{10}-C_{50} des échantillons prélevés à Gatineau. Les valeurs des résidus non lavés permettent de les classer dans la catégorie BC de la « Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés ». Les résidus lavés affichent quant à eux des concentrations de l'ordre de 400 mg/kg. Ils sont donc classés dans la catégorie AB.

La même classification peut être attribuée aux échantillons de Granby. En effet, leurs valeurs affichent des taux légèrement supérieurs à ceux de Gatineau, mais demeurent dans les mêmes catégories. La Figure 4.13 illustre les concentrations de ces échantillons.

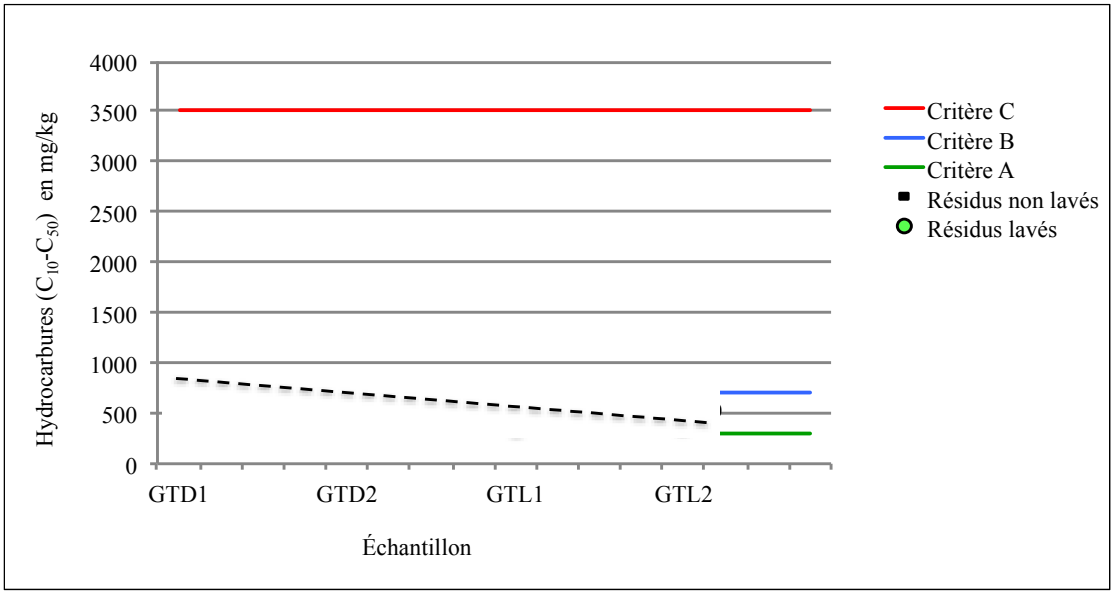


Figure 4.12 Diagramme des concentrations en hydrocarbures C_{10}-C_{50} des résidus de Gatineau

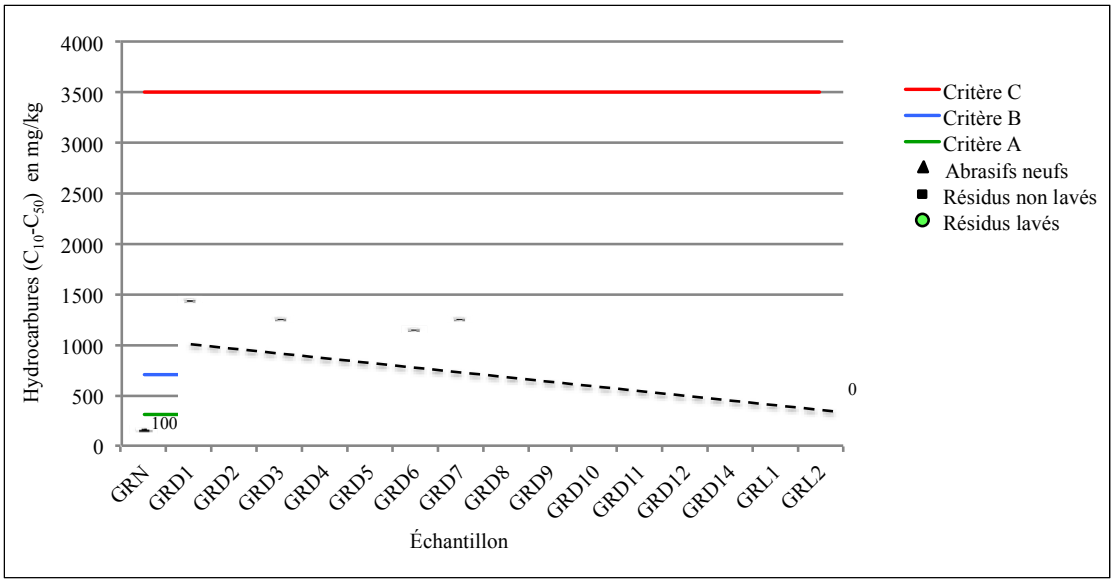


Figure 4.13 Diagramme des concentrations en hydrocarbures C_{10}-C_{50} des résidus de Granby

Analyse des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les résultats analytiques de cette analyse sont présentés à l'Annexe V.
Les échantillons GTD et GTL de Gatineau soumis à cette analyse affichent des concentrations inférieures au critère A pour tous les échantillons analysés.

Les échantillons de Granby donnent des concentrations inférieures au critère A pour les échantillons neufs GRN, des concentrations de certains HAP supérieures au critère A et inférieures au critère B pour les résidus non lavés GRD. Il s'agit notamment des composés organiques semi-volatils. Les analyses effectuées sur ces échantillons permettent de les classer dans la catégorie A-B. Le même critère sera retenu pour les échantillons GRL représentant les résidus lavés.

Analyses des métaux et des métalloïdes

L'analyse des résultats, tel qu'illustrés dans la Figure 4.14, montre que les échantillons de Gatineau sont essentiellement contaminés au zinc. Leur teneur inférieure à 500 mg/kg permet

de les classer dans la plage A-B de la « Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés ».

Le zinc, le cuivre, le nickel, le baryum, le plomb et le manganèse sont des métaux présents dans les résidus. Leurs teneurs sont cependant inférieures aux teneurs de fond naturelles et ce pour toutes les catégories d'échantillons analysés, hormis l'échantillon GTL1 qui présente une concentration en molybdène de 21 mg/kg et une concentration en plomb de 100 mg/kg. Ces contaminations isolées sont considérées accidentelles. Les résultats de l'analyse sont présentés dans l'Annexe V.

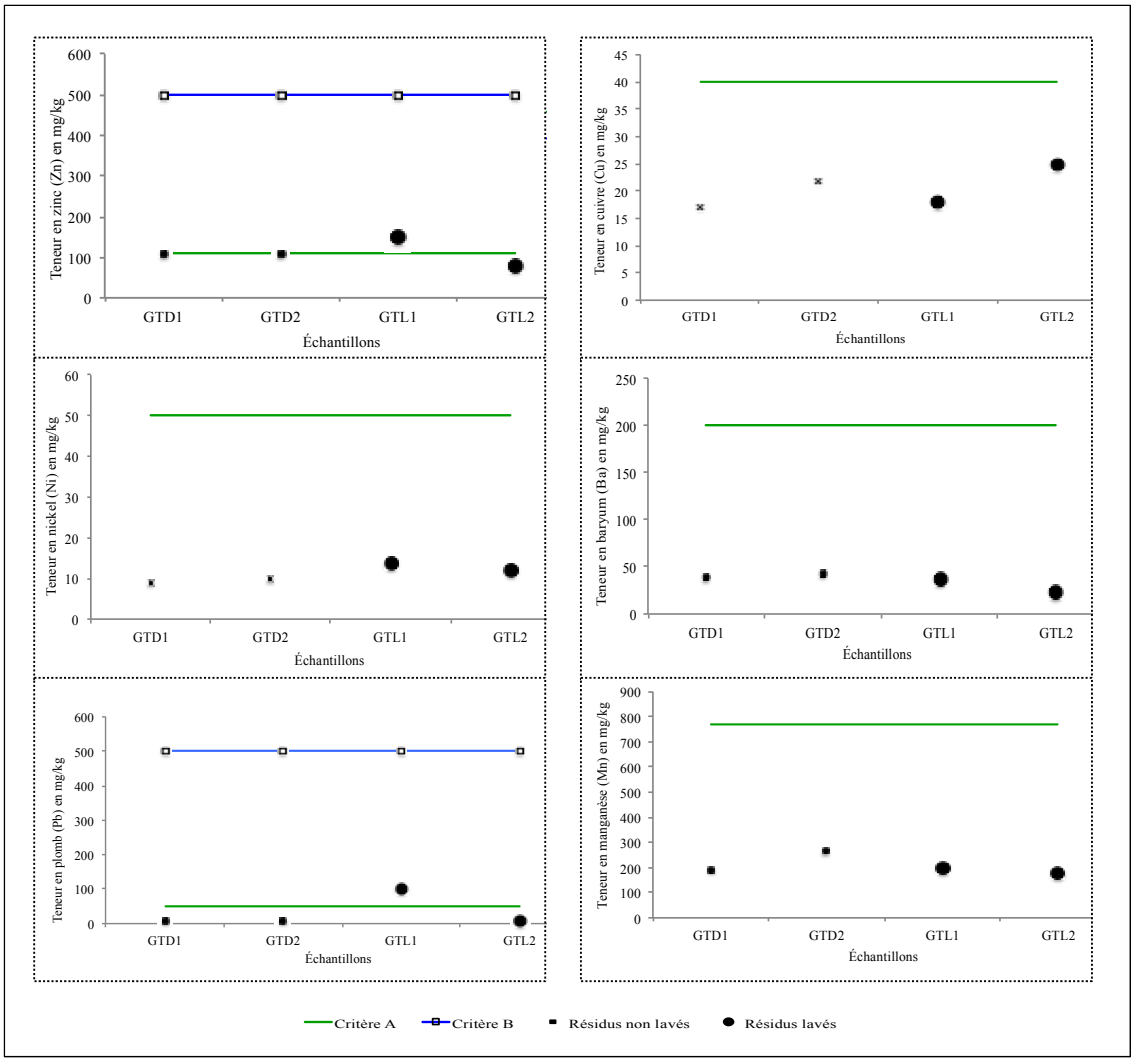


Figure 4.14 Concentrations en métaux lourds (Zn, Cu, Ni, Ba, Pb, Mn) des résidus bruts et lavés de Gatineau

La Figure 4.15 illustre les teneurs en métaux des abrasifs et des résidus de Granby.

L'interprétation des résultats de caractérisation des échantillons de Granby montre que le manganèse, le baryum, le cuivre, le plomb, le nickel et le zinc sont des métaux présents, mais à des teneurs inférieures au seuil du critère générique A et ce pour toutes les catégories d'échantillons analysés.

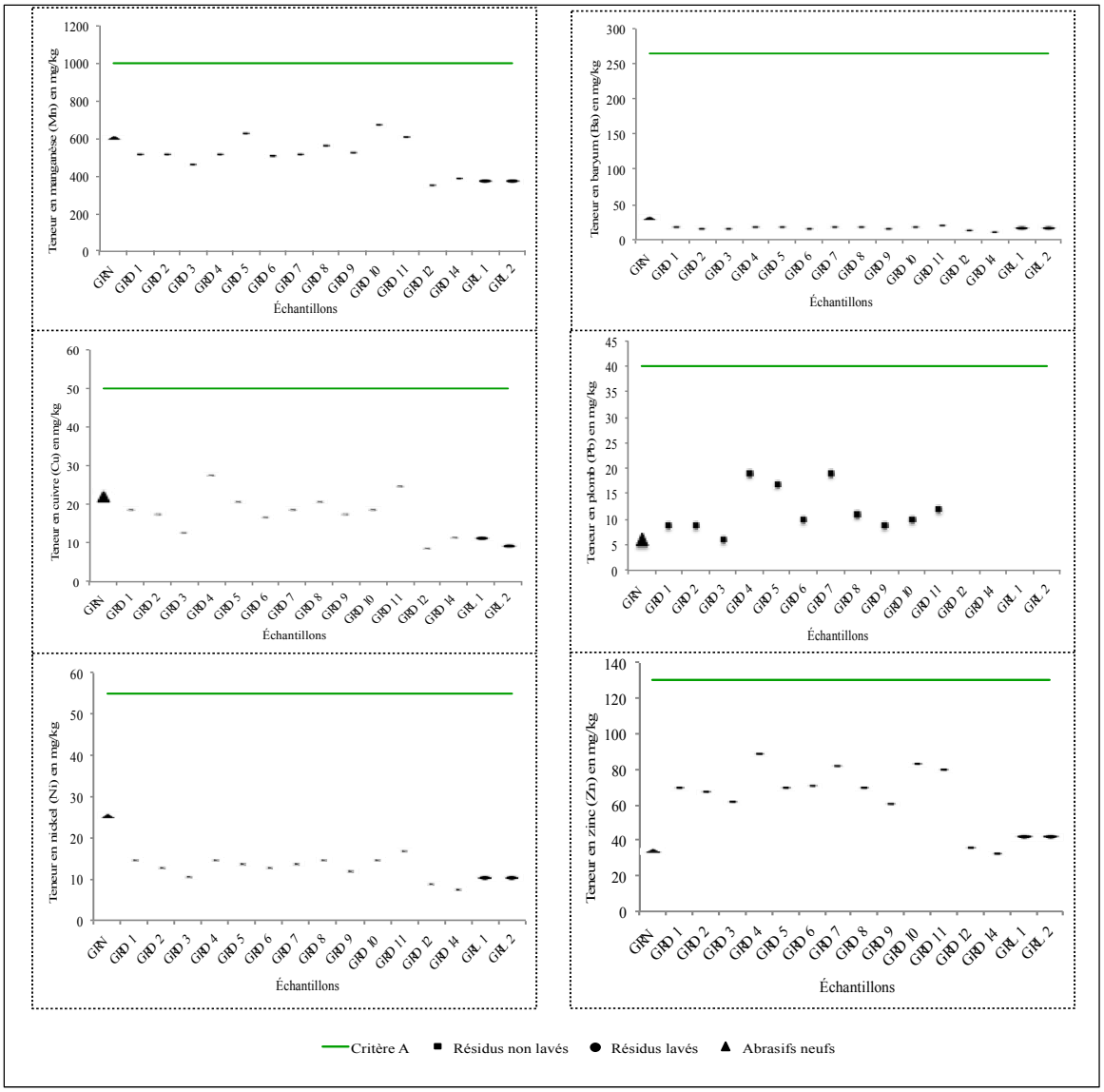


Figure 4.15 Concentrations en métaux lourds (Zn, Cu, Ni, Ba, Pb, Mn)
des résidus bruts et lavés de Granby

Essais de lixiviation

Conformément aux exigences contenues dans les « Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille » concernant l'analyse des contaminants inorganiques, trois essais de lixiviation sont obligatoires dans les lixiviats des paramètres excédant le critère A.

Cependant, ces essais sont généralisés à tous les autres métaux contenus dans les échantillons de Gatineau, y compris ceux ne présentant pas de contamination au dessus du critère A.

Ces essais sont réalisés pour déterminer la concentration des métaux susceptibles d'être lixiviés en contact avec l'eau (CTEU 9) et les pluies acides (SPLP, EPA 1312). L'essai (TCLP, EPA 1311) permet quant à lui, d'évaluer la mobilité des espèces inorganiques.

Les résultats de l'essai sont présentés à l'annexe V. Ils indiquent que les concentrations en métaux des lixiviats des résidus de Gatineau sont toutes en dessous des concentrations maximales d'un contaminant dans le lixiviat d'une matière solide, établies par le « Règlement sur les matières dangereuses » du MDDEFP. L'annexe VIII montre les valeurs maximales admises en regard des essais de lixiviation. Il en résulte un faible potentiel de lixiviation des métaux contenus dans la matrice totale.

Concernant les échantillons de Granby, comme aucun paramètre inorganique n'excède le critère A, l'analyse des lixiviats n'est pas effectuée.

Analyse de la conductivité hydraulique

Les échantillons soumis à cette analyse proviennent des échantillons GRD, identifiés dans le chapitre 3.3.3. Les analyses ont été effectuées sur trois échantillons qui présentent un pourcentage de passant à 80 µm important. Les résultats sont présentés à l'annexe V. Il en résulte un coefficient de perméabilité supérieur à 1×10^{-4} cm/s.

4.3.2 Analyse et discussion

Les résultats d'essais effectués sur les échantillons des résidus de balayage de Gatineau récupérés au printemps 2013 non lavés, indiquent des concentrations en C_{10}-C_{50} supérieures à 700 mg/kg et inférieures à 3500 mg/kg pour l'échantillon GTD2 et des concentrations inférieures à 700 mg/kg pour l'échantillon GTD1. En tenant compte du cas le plus

défavorable, ils seront classés dans la plage B-C des critères génériques de la « Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés ».

Les abrasifs tamisés et lavés à l'hydrocyclonneur affichent quant à eux, des concentrations inférieures au critère B mais supérieures au critère A. Cela les classe dans la catégorie A-B. La même tendance pourrait être établie pour les abrasifs de Granby.

En effet, le lavage a permis de réduire de plus que 60% les teneurs en hydrocarbures C_{10} C_{50} dans les matrices totales des abrasifs récupérés et lavés. Ces taux ne descendent toutefois pas en dessous de 300 mg/kg, ce qui leur aurait permis d'approcher les valeurs des abrasifs neufs et ainsi afficher la catégorie A des critères génériques de la PPSRTC.

Concernant les HAP, les résultats de Gatineau indiquent des concentrations inférieures au critère générique A. Il est à noter cependant, que les taux de concentrations ont sensiblement diminué sous l'effet du tamisage et du lavage des abrasifs.

Les échantillons de Granby affichent par contre des teneurs supérieures au critère A pour certains composés organiques semi volatils. Ces composés sont probablement contenus dans les hydrocarbures fixés par les matériaux abrasifs.

Quant à la contamination par les métaux, les résultats indiquent des teneurs inférieures au critère générique A pour la majorité des échantillons de Gatineau analysés, hormis le zinc et le plomb, qui sont présents à des teneurs supérieures au critère A et inférieures au critère B. Un cas de concentration élevée de molybdène, dû probablement à une contamination accidentelle, a été considéré isolé et a été écarté. Ceci permet de les classer dans la catégorie A-B des critères génériques de la PPSRTC.

L'analyse des résultats montre que les concentrations en métaux des lixiviats analysés sur les résidus de balayage de 2013, sont toutes en dessous des concentrations maximales d'un contaminant dans le lixiviat d'une matière solide, établies par le « Règlement sur les matières

dangereuses » du MDDEFP. Il est ainsi possible de conclure que le potentiel de lixiviation des métaux accrochés aux abrasifs est faible.

En résumé, le tamisage et le lavage par hydrocyclonnage ont permis de réduire les taux de tous les contaminants organiques et non organiques, sans toutefois les éliminer. Les abrasifs nettoyés ont une composition chimique différente de celles des abrasifs neufs. Leurs teneurs en contaminants leur permettent d'être classés dans la catégorie 3 des « Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille ». Cette catégorie leur ouvre la voie à de multiples débouchés à condition bien évidemment que les abrasifs lavés aient les propriétés physiques et mécaniques des granulats qu'ils vont remplacer. Le Paragraphe suivant statut sur ce dernier point précisément.

4.4 Évaluation des propriétés physiques des abrasifs nettoyés

L'objectif de cette quatrième phase expérimentale est d'évaluer le bénéfice tiré de l'opération de nettoyage par lavage et tamisage à l'hydrocyclonnage et de se prononcer sur les performances des abrasifs issus de ce procédé. Il s'agit de mesurer en premier, les propriétés intrinsèques et géotechniques des abrasifs. En second, il s'agit de valider l'efficacité de l'opération de nettoyage sur la réduction de fines dans les résidus ramassés par balayage. Ces fines < 80 µm, tel que décrit dans le chapitre 2.4, représentent pour les résidus échantillonnés en 2012, plus de 6% de la masse totale des échantillons. Enfin, ce chapitre abordera le taux de récupération des abrasifs susceptibles d'être réutilisés.

4.4.1 Caractérisation physique des matériaux

Les échantillons soumis à cette caractérisation proviennent des tas GTN, GTD et GTL de Gatineau, ainsi que des tas GRN, GRD et GRL de Granby, identifiés dans les chapitres 3.3.2, 3.3.3 et 3.3.4

Analyse granulométrique - Méthode LC 21-040

Les résultats de l'analyse granulométrique des échantillons de Gatineau sont illustrés dans le Tableau 4.5 et dans l'Annexe VI. Le Tableau 4.6 montre les résultats des échantillons de Granby

Tableau 4.5 Récapitulatif des résultats granulométriques des abrasifs de Gatineau

Tamis (mm)	GTN	GTD1	GTD2	GTL1	GTL2	GTL moy
	Neufs	Non lavés		Lavés		
28	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100
14	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100
5	84	97	98	99	99	99
2,50	22	86	80	83	77	80
1,250	10	79	72	66	58	62
0,630	7	53	51	48	48	48
0,315	4	36	29	32	32	32
0,160	3	16	14	15	14	14,5
0,080	1	5	5	2,5	2,3	2,4

Tableau 4.6 Récapitulatif des résultats granulométriques des échantillons de Granby

Tamis (mm)	GRN	GRD 1	GRD 2	GRD 3	GRD 4	GRD 5	GRD 6	GRD 7	GRD 8	GRD 9	GRD 10	GRD 11	GRD 12	GRD 13	GRD 14	GRL
	Neuf	Non lavés														Lavé
20	100	100	100	98	97		100	100	100	100					100	100
14	100	99	97	96	93	100	96	98	98	99	100	100	100	100	97	100
10	100	96	95	95	92	99	93	96	95	97	98	98	99	99	94	100
5	76	85	84	85	84	88	84	88	85	87	88	91	92	94	85	94
2,50	12	55	50	57	62	52	50	60	55	49	53	53	64	57	38	62
1,250	5	40	35	41	45	37	34	45	38	31	38	34	46	35	18	41
0,630	4	31	26	30	33	28	25	34	28	23	29	25	35	24	11	28
0,315	3	22	19	19	22	20	17	23	19	16	20	17	24	16	8	17
0,160	3	14	12	11	13	13	11	13	12	11	12	11	14	10	6	8
0,080	2,7	8,3	7,4	5,5	6,4	7,5	6,4	7,0	6	6,7	6,2	6,7	7,6	5,9	3,7	1,7

Évolution des courbes granulométriques

La superposition des courbes de Gatineau des échantillons GTD et GTL avec la courbe de l'échantillon GTN, illustrée à la Figure 4.16, montre un relèvement des courbes GTD et GTL. La courbe de l'abrasif neuf montre une granulométrie restreinte avec seulement 1% de passant au tamis 80 µm et 22 % de passant au tamis 2,5 mm. Les courbes GTD affichent une augmentation de la fraction < 2,5 mm, passant de 22% à plus de 80%. Les particules fines < 80 µm représentent 5% des échantillons non lavés et 2,4% des échantillons lavés, soit une diminution de l'ordre de 50% grâce au lavage par hydrocyclonnage.

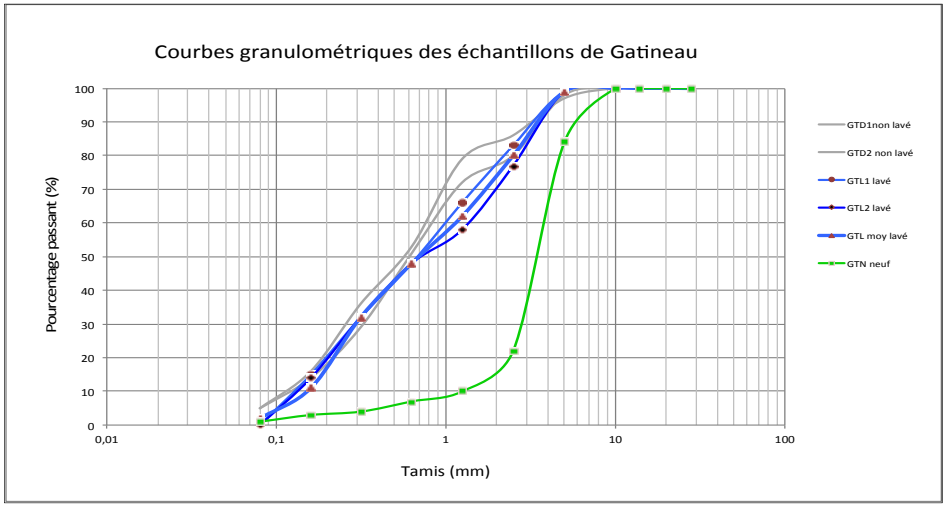


Figure 4.16 Courbes granulométriques des échantillons de Gatineau

Les échantillons de Granby affichent la même tendance d'abrasion avec notamment une augmentation de passants au tamis 2,5 mm pour atteindre une moyenne de 57%, comparativement à 12% pour l'abrasif neuf. Le taux de fines des échantillons lavés est estimé quant à lui à 1,7%. La Figure 4.17 montre notamment la nette réduction des fines et la concentration des granulats dans le fuseau 0 - 2,5 mm.

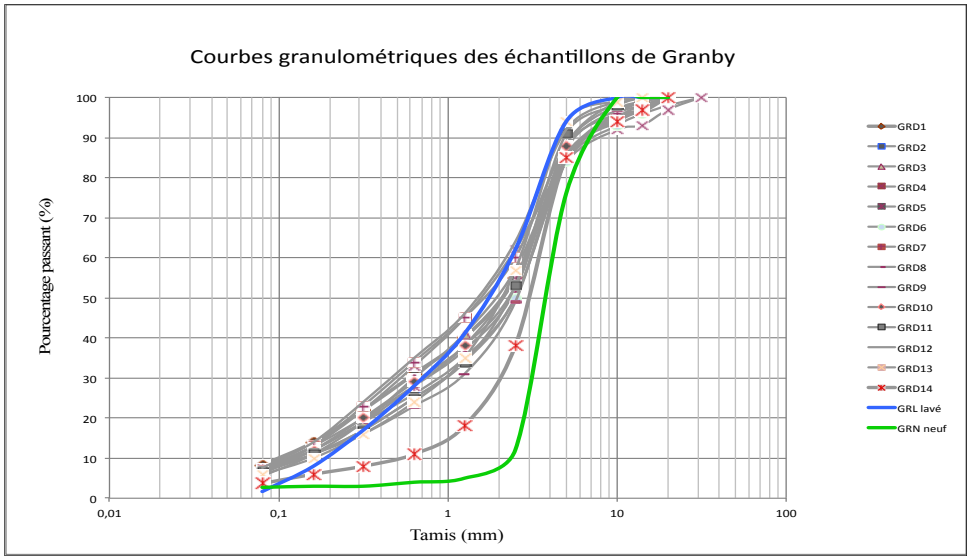


Figure 4.17 Courbes granulométriques des échantillons de Granby

Coefficient d'écoulement – Méthode LC 21-075

La Figure 4.18 montre l'évolution du coefficient d'écoulement des granulats fins des abrasifs de Gatineau. Il en résulte une diminution du coefficient d'écoulement et donc une perte d'angularité importante après seulement un cycle hivernal. Cependant, l'action du lavage a permis de réduire la fraction des fines dans les granulats et augmenter le coefficient d'écoulement. Le coefficient après lavage dépasse la valeur de 80.

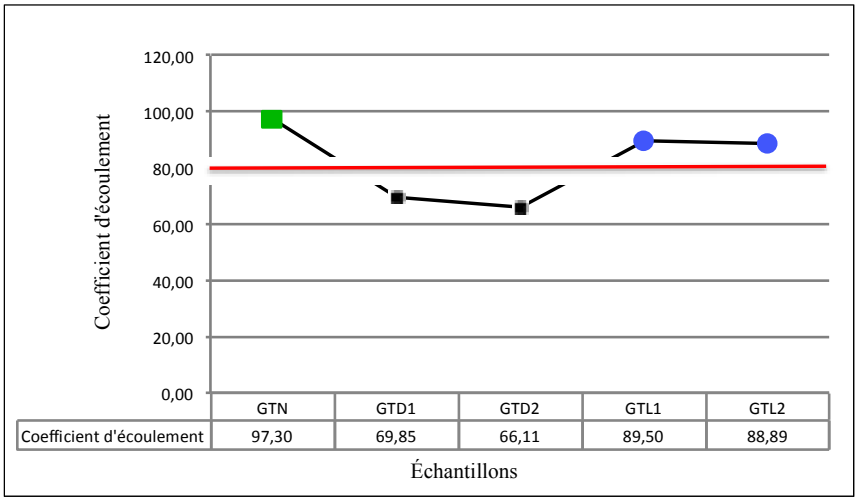


Figure 4.18 Coefficient d'écoulement des échantillons de Gatineau

La Figure 4.19 montre quant à elle l'évolution de l'angularité des matériaux échantillonnés de Granby après avoir subi un cycle hivernal, notamment une diminution du coefficient d'écoulement. Cette perte d'angularité n'est toutefois pas importante.

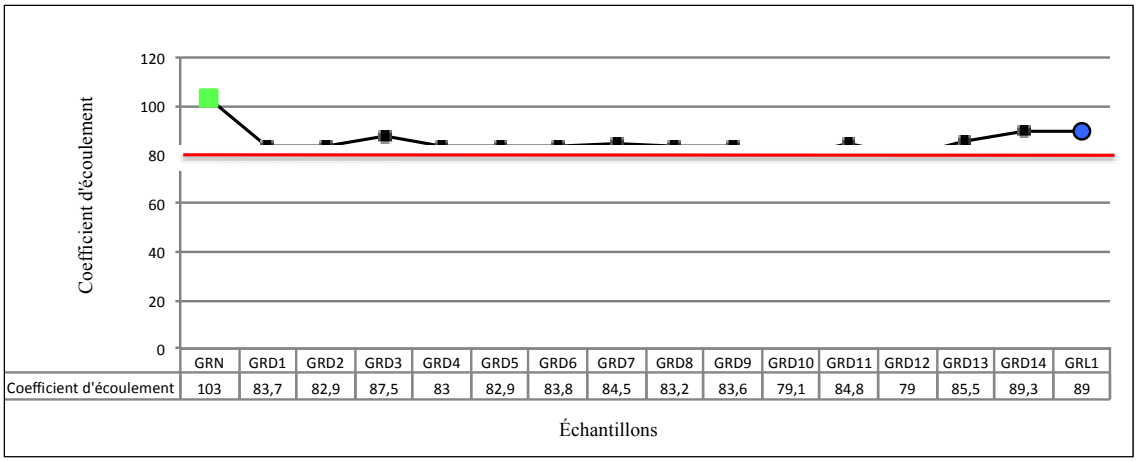


Figure 4.19 Résultats de l'essai d'écoulement des échantillons de Granby

Essais de friabilité et Micro-Deval-Méthodes LC 21-080 et LC 21-101

Les Tableaux 4.7 et 4.8 récapitulent les résultats de friabilité, du pourcentage d'usure et du coefficient d'écoulement des abrasifs de Gatineau et de Granby.

Tableau 4.7 Récapitulatif des résultats de friabilité, du pourcentage d'usure et du coefficient d'écoulement des abrasifs de Gatineau

	GTN	**GTD1**	**GTD2**	**GTL1**	**GTL2**
Pourcentage d'usure	11,32	17,12	20,17	18,32	17,25
Friabilité	33,13	26,12	25,42	24,20	25,74
Coefficient d'écoulement	97,3	69,85	66,11	89,50	88,89

Tableau 4.8 Récapitulatif des résultats de friabilité, du pourcentage d'usure et du coefficient d'écoulement des abrasifs de Granby

Échantillons	GRN	GR D1	GR D2	GR D3	GR D4	GR D5	GR D6	GR D7	GR D8	GR D9	GR D10	GR D11	GR D12	GR D13	GR D14	GR L1	GR L3	GR L4
Friabilité	20																24	27
Micro-Deval < 5 mm		13	11	14	11	12	12	19	9	17	13	9,1	14	6,4	7,5	14	17	15
Coefficient d'écoulement	103	84	83	87	83	83	84	84	83	84	79	85	79	85	89	89		

Les résultats de ces essais montrent l'évolution des paramètres de résistance des abrasifs.

Les résidus de Gatineau affichent une hausse des valeurs de Micro-Deval par rapport aux abrasifs neufs et donc une baisse de la résistance à l'attrition. Cette tendance s'est inversée après leur lavage. Les valeurs obtenues sont de l'ordre de 18%., nettement inférieures à 30%. La friabilité est de l'ordre de 25%. Les Figures 4.20 et 4.21 présentent l'évolution du Micro-Deval et de la Friabilité des abrasifs de Gatineau.

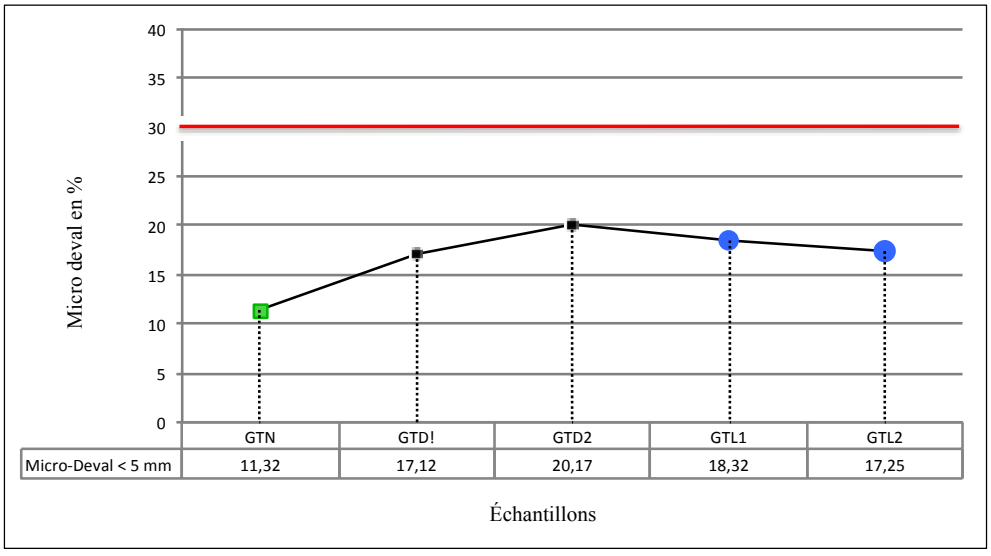


Figure 4.20 Valeurs de Micro-Deval des abrasifs de Gatineau

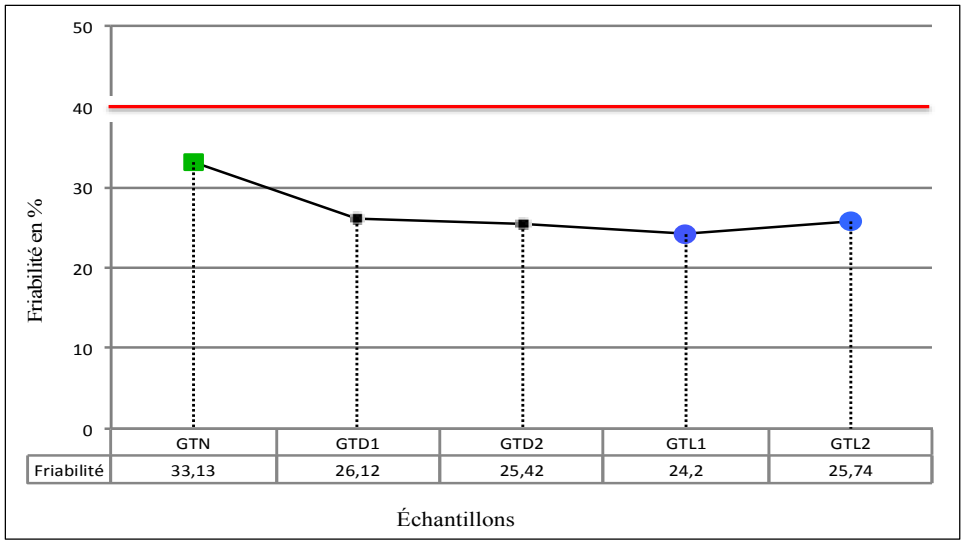


Figure 4.21 Valeurs de friabilité des abrasifs de Gatineau

Les abrasifs lavés de Granby ont des valeurs de Micro-Deval inférieures à 20% et des coefficients de friabilité situés entre 24% et 27%.

La Figure 4.22 représente l'évolution du pourcentage d'usure des résidus de Granby avant et après lavage.

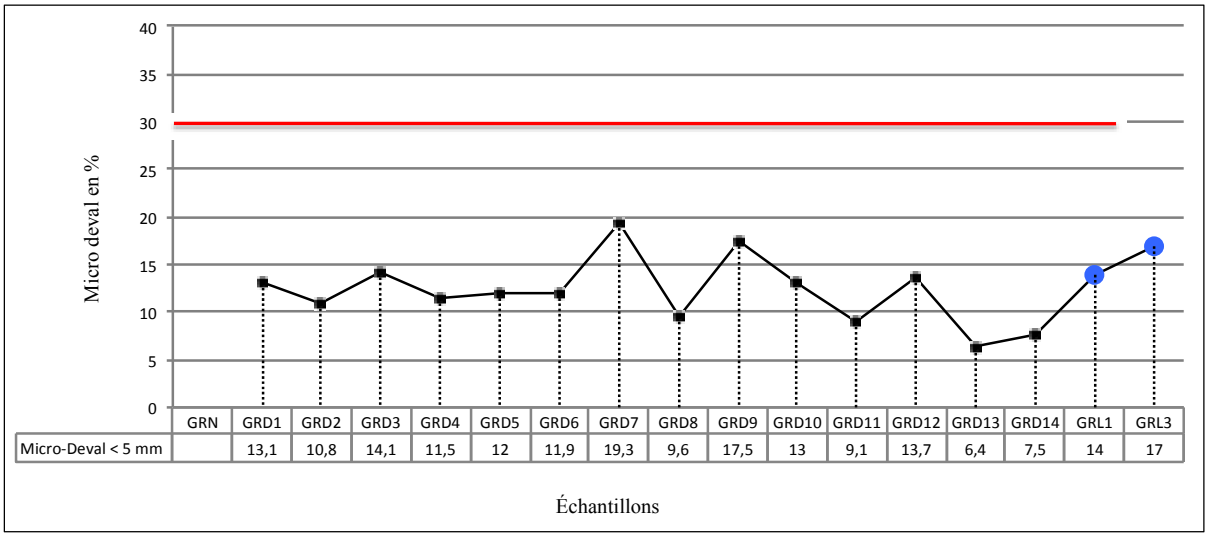


Figure 4.22 Courbes des résultats de Micro-Deval

Colorimétrie – Méthode A23.2-7A

Les échantillons de Gatineau soumis à l'analyse de l'indice colorimétrique montrent des indices de valeur qui permettent aux granulats une acceptabilité selon les exigences de la norme CSA A23.1 relative aux impuretés organiques, tel qu'illustrés dans le Tableau 4.9.

Tableau 4.9 Récapitulatif des résultats d'essai de colorimétrie

Échantillons	**GTN**	**GTD1**	**GTD2**	**GTL1**	**GTL2**
Indice colorimétrique	1	3	3	2	2

Les résultats des échantillons de Granby sont illustrés dans le Tableau 4.10.

Tableau 4.10 Récapitulatif des résultats d'essai de colorimétrie

Échantillons	GRN	GRD 1	GRD 2	GRD 3	GRD 4	GRD 5	GRD 6	GRD 7	GRD 8	GRD 9	GRD 10	GRD 11	GRD 12	GRD 13	GRD 14	GRL
Indice colorimétrique	1	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3

4.4.2 Taux de récupération

L'opération de tamisage et de lavage a permis dévaluer les proportions des abrasifs effectivement récupérés ainsi que les taux de fines et de déchets grossiers. La Figure 4.23 montre que des 89 tonnes de résidus nettoyés de Gatineau, 79 tonnes, soit 89,13% représentent des granulats ayant la composition et la texture des abrasifs neufs. Les fines aspirées par l'hydrocyclonneur sont évaluées à 4,92% du mélange. Les déchets grossiers représentent quant à eux 5,95%.

Quantités recueillies après lavage	t	%
Quantités considérées avant lavage	98	
Tamisage et lavage des résidus considérés	88,640	100
Déchets grossiers recueillis	5,28	5,95
Fines recueillies dans les bassins de sédimentation	4,36	4,92
Abrasifs recueillis après hydrocyclonage	79	89,13

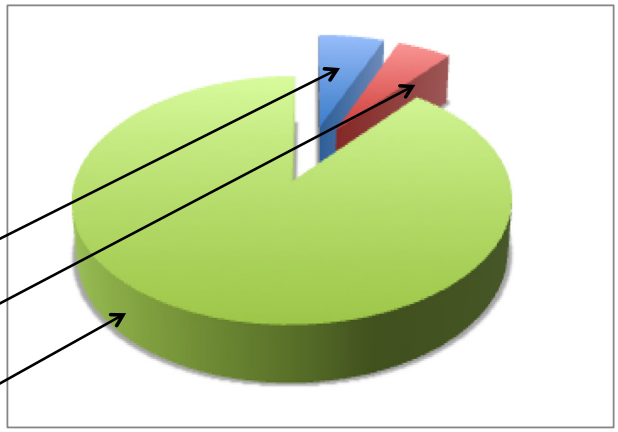


Figure 4.23 Proportions des abrasifs récupérés après lavage

4.4.3 Analyse et discussion

Les différentes caractérisations effectuées dans ce Paragraphe donnent une image sur le comportement des abrasifs sous l'effet de nombreuses et différentes sollicitations. Les efforts de compression produits par le passage des roues des véhicules, l'action du vent, de la neige, de la glace, du gel, de la pluie, du gradient thermique et bien d'autres facteurs liés à l'environnement du lieu d'épandage, ont modifié les paramètres intrinsèques et géotechniques des abrasifs.

Les paramètres de résistance affichent d'excellentes valeurs pour les matériaux fins. Leurs taux d'usure et de friabilité qui affichent des résultats en dessous de 30 %, permettent de les classer dans la catégorie 1 des granulats fins selon le tableau 4 de la norme NQ 2560-114-I/2002. Leur coefficient d'écoulement est de l'ordre de 89. Ils sont de ce fait, conformes aux exigences des tableaux 2 et 3 de la norme NQ 2560-114-V/2002.

Le plus grand préjudice subi par les abrasifs est sans aucun doute l'abrasion des granulats. En effet, alors que la fraction 2,5 - 5 mm est la plus dominante pour les abrasifs neufs, avec un taux de l'ordre de 60%, les résidus balayés et même lavés contiennent 60% à 80% de

passants au tamis 2,5 mm. Il y a donc eu un transfert de la fraction dominante. Ceci n'est pas sans conséquences sur la suite du cycle de vie des abrasifs.

Le relèvement des courbes, tendance similaire pour la campagne de 2102, représente une donnée importante à envisager quand viendra le temps de considérer les opportunités de réutilisation.

Il est important de souligner à ce stade de l'étude que le lavage et le tamisage par hydrocyclonneur a rempli un triple objectif. D'abord, ce procédé a permis de réduire les fines < 80 µm à un taux inférieur à 2%, ce qui est déjà considérable. Ensuite, certains paramètres tel que l'angularité ont augmenté, du fait précisément de la réduction de ces fines. Enfin, l'allure et la texture des matériaux récupérés donnent l'aspect des matériaux granulaires ordinaires.

En définitive, ce sont des granulats qui ont subi de multiples transformations et qu'il faut désormais considérer comme des matériaux ayant leurs propres caractéristiques et envisager leur réutilisation en fonction de leurs paramètres physiques et chimiques, en accord avec les lois, normes et règlements en vigueur au Québec.

4.5 Classification et perspectives de réutilisation des abrasifs nettoyés

La présente section a pour objectif de passer en revue les principales voies de réutilisation des abrasifs en fonction de leurs paramètres et des normes et lois en vigueur au Québec.

4.5.1 Hypothèses

Il existe une similitude de contexte, de l'usage ainsi que des sources potentielles de contaminations entre les abrasifs et les matériaux concernés par les « Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille » du MDDELCC, appelées « lignes directrices » dans le présent document.

En effet, les abrasifs sont épandus sur la surface de la chaussée. Ils ne la quitteront plus, du moins pour ceux qui sont ramassés, jusqu'à leur balayage. Le milieu récepteur des contaminants est donc similaire à celui de la chaussés. Les sollicitations physiques et mécaniques sont également semblables. Étant des matériaux granulaires, leur usage correspondrait parfaitement à l'usage des enrobés ou des bétons traités par les « Lignes directrices ».

Cette forte similitude oriente cette thèse vers l'utilisation des « Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille » comme support règlementaire pour classifier les matériaux abrasifs nettoyés et de ce fait envisager les voies de réutilisation possibles.

4.5.2 Classification

Les paramètres chimiques des abrasifs nettoyés permettent de les classer dans la catégorie 3 des « Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille » (MDDEP, 2009). Les teneurs que les matériaux affichent sont permises par ces lignes directrices pour un certain nombre de domaines d'utilisation.

L'Annexe VII présente le tableau de classification de matériaux en fonction de leur contamination. Cette catégorie permet une utilisation entre autres dans les domaines suivants : enrobés à chaud, enrobé à froid, stationnements et aires de stockage sur un terrain à vocation résidentielle ou agricole, un établissement d'enseignement primaire ou secondaire, un centre de la petite enfance ou une garderie, un stationnement, une aire de stockage sur un terrain à vocation institutionnelle, commerciale et industrielle incluant les terrains municipaux et matériel de recouvrement journalier de type LET, et bien d'autres domaines. L'Annexe VII présente le tableau d'utilisations permises en fonction des catégories de matériaux selon les lignes directrices citées précédemment.

Sur le plan physique, les valeurs obtenues permettent de classer les abrasifs nettoyés dans la catégorie 1 des granulats fins selon la norme NQ 2560-114/2002. Le contenu de cette classification est illustré dans le Tableau 4.4

Les Tableaux 4.11 et 4.12 récapitulent les propriétés physiques et chimiques des abrasifs caractérisés dans cette thèse, incluant leur classification chimique selon les « lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille » et leur classification physique selon la norme NQ 2560-114/2002.

Tableau 4.11 Caractéristiques et classification physique et chimique des abrasifs de Granby

Caractérisation	Paramètres	Abrasifs neufs	Résidus	
			Résidus non lavés	Résidus lavés
Chimie	HP (C_{10}-C_{50})		A-B	A-B
	HAP		A-B	A-B
	Métaux - prédominance		< A	< A
	Lixiviation		< A	
	Colorimétrie	1	3	3
	Catégorie [1]			3
Physique	Granulométrie			Fuseau AB-10
	Micro Deval		9-19	14-17
	Friabilité	20		24-27
	Coefficient d'écoulement	103 ≥ 80	79-89	89
	Catégorie [2] granulats fins	1	1	1

[1] selon les « lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille »

[2] selon la norme NQ 2560-114/2002

Tableau 4.12 Caractéristiques et classification physique et chimique des abrasifs de Gatineau

Caractérisation	Paramètres	Abrasifs neufs	Résidus 2012		Résidus 2013	
			Résidus non lavés	Résidus non lavés fractionnés	Résidus non lavés	Résidus lavés
Chimie	HP (C_{10}-C_{50})		B-C		B-C	A-B
	HAP		< A		< A	< A
	Métaux - prédominance		A-B (Cu, Zn)	A-B (Cu, Zn)	A-B (Zn)	A-B (Pb, Zn)
	Lixiviation		< A		< A	
	Colorimétrie	1	3		3	2
	Catégorie [1]		3		3	3
Physique	Granulométrie					Fuseau AB-10
	Micro Deval	11,32	22		18,65	17,78
	Friabilité	33,13	26		25,77	24,97
	Coefficient d'écoulement	97,3 ≥ 80	66,63 < 80		67,98 < 80	89,19 ≥ 80
	Catégorie[2] granulats fins	1	1		1	1

[1] selon les « lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille »

[2] selon la norme NQ 2560-114/2002

4.5.3 Réutilisation comme abrasifs

Les Figures 4.24 et 4.25 montrent l'intégration des courbes granulométriques des abrasifs nettoyés de Granby et de Gatineau dans le fuseau AB 10 des abrasifs neufs selon le tableau 1 de la norme NQ 2560-114-VI/2002. Ils sont de ce fait, adaptés pour les abrasifs composés de granulats concassés. Quant à l'exigence de la teneur en eau, tel qu'illustrée dans le Tableau 2.5, la satisfaction du taux maximal d'humidité contenue dans les abrasifs, qui est de 5%, ne devrait pas poser de contraintes pratiques.

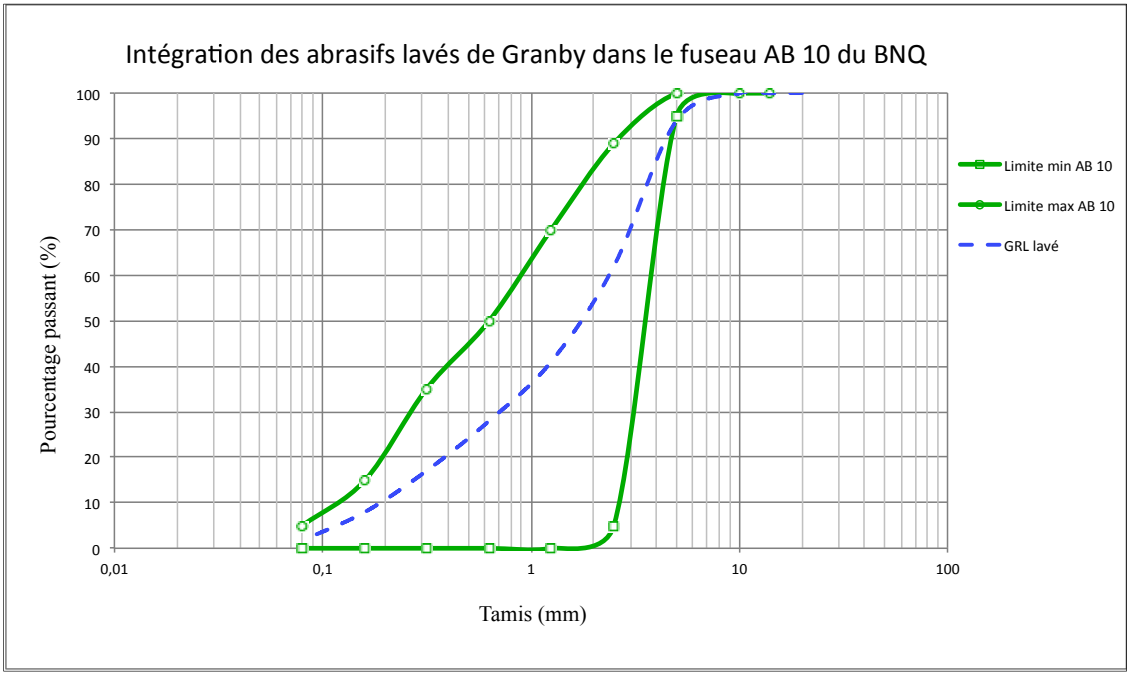


Figure 4.24 Intégration de la courbe granulométrique des abrasifs lavés de Granby dans le fuseau AB 10

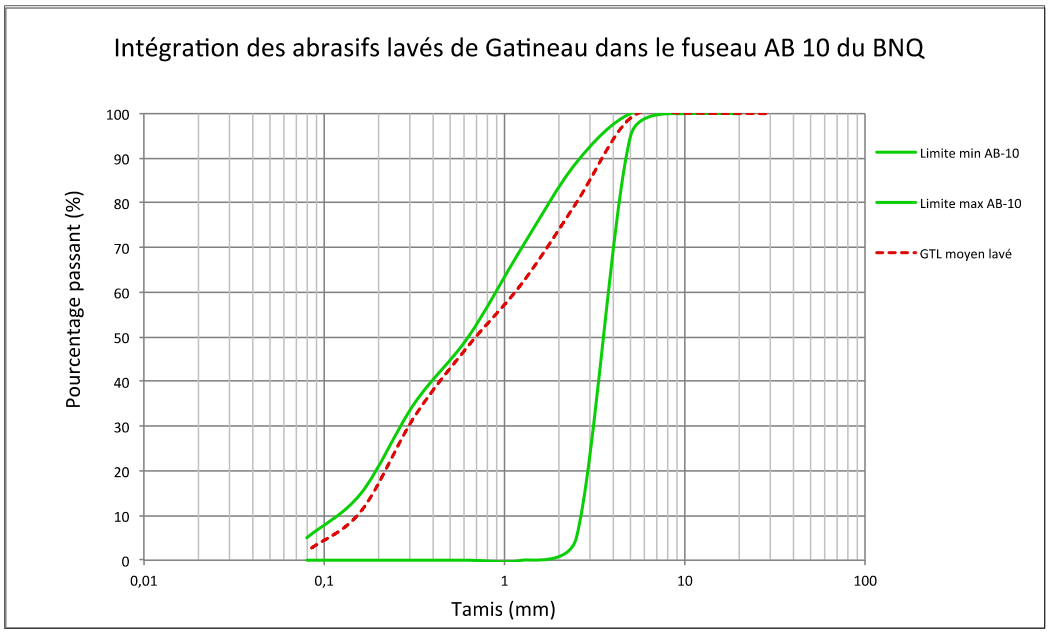


Figure 4.25 Intégration de la courbe granulométrique des abrasifs lavés de Gatineau dans le fuseau AB 10

Leurs propriétés physiques leur permettent donc possiblement une réutilisation comme abrasifs pour un second épisode hivernal. Cependant, les échantillons de Granby présentent des teneurs en hydrocarbures C_{10}-C_{50} supérieures au critère A et sont classés dans la catégorie A-B, tel qu'illustré dans le Tableau 4.12. L'autorisation du MDDELCC est dans ce cas requise.

4.6 Intégration des abrasifs dans les enrobés

L'objectif de cette ultime phase expérimentale est de valider un domaine d'application possible pour la réutilisation des abrasifs. La démarche consiste à substituer la fraction 0/5 mm d'un enrobé par de la pierre abrasive issue du lavage et du tamisage et à évaluer le comportement du mélange ainsi obtenu.

4.6.1 Limites

Le but de cette démarche n'est pas d'optimiser une formulation. Il s'agit d'évaluer sommairement le comportement d'un enrobé confectionné avec un pourcentage d'abrasifs donné et d'en vérifier la conformité suivant les exigences du Ministère en ce qui a trait aux caractéristiques et aux critères d'évaluation des enrobés à chaud formulés selon la méthode Marshall et la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées en utilisant la presse à cisaillement giratoire (PCG).

4.6.2 Formulation selon la méthode Marshall

Les échantillons soumis à cette formulation proviennent des tas GRL, abrasifs lavés et nettoyés de Granby, identifiés dans le Paragraphe 3.3.4. Le fuseau granulométrique de l'enrobé ciblé est celui d'un EB-10S, enrobé fréquemment utilisé en milieu municipal en couche de surface.

Une combinaison des différents granulats permet d'optimiser les pourcentages d'abrasifs et de pierre de calibre 5-10 pouvant être utilisés afin qu'ils puissent intégrer le fuseau exigé

dans le tableau 4201-1 de la norme 4201 du Ministère des Transports du Québec pour un enrobé de type EB-10S (*Voir Annexe VIII*).

Dans le but de maximiser la proportion des abrasifs dans la formulation des enrobés, des pourcentages de 60 % d'abrasifs et de 35 % de pierre de calibre 5-10 sont retenus. Quelques corrections nécessaires sont cependant apportées au mélange. Des fillers sont incorporées car la proportion de fines < 80 µm dans la pierre abrasive lavée est de 1.7 %, l'exigence minimale étant de 4 %. La proportion de filler utilisée est de 5%.

Les granulats sont réduits au laboratoire selon la méthode d'essai LC 26-010. Les proportions ainsi obtenues sont résumées dans le Tableau 4.13. Le bitume utilisé est de classe PG 58-28 dont les caractéristiques sont illustrées dans le tableau 4101-1 de la norme 4101 du Ministère des Transports du Québec.

Tableau 4.13 Proportions de granulats utilisées pour la confection des enrobés

Tamis (mm)	**5-10 Raycar 35%**	**Pierre abrasive GRL, Granby 60 %**	**Sable**	**Filler 5%**	**Fuseau EB-10S**	**Combiné ÉTS**
14	100	100	100	100	100	100
10	93,5	100	100	100	92-100	98
5	8,2	94	99	100	50-65	64
2.5	1,9	62	96	100	27-50	43
1.25	1,4	41	93	100	18-42	30
0.63	1,4	28	87	100	12-35	22
0.315	1,3	17	47	100	8-26	16
0.16	1,3	8	8	98	5-17	10
0.08	1,2	1,7	1	86	4-10	6

Deux formulations sont retenues. La première avec une teneur en bitume de 4.8 %, la seconde avec 5.2 %. Les résultats illustrés dans le Tableau 4.14, montrent une stabilité de l'ordre de 14 000 N et un fluage de l'ordre de 3.7 mm pour le mélange à 4.8 % de teneur en bitume.

Tableau 4.14 Caractéristiques des enrobés confectionnés avec 60 % d'abrasifs

	Mélange 1	**Remarque**	**Mélange 2**	**Norme -MTQ**	**Remarque**	**Méthode d'essai**
Nombre minimal de granulats	3	conforme	3	2	conforme	
Liant (% min)	4.8	conforme	5.2	5.20	conforme	
Fluage (mm)	3.69	conforme	4.51	2.0-4.0	non conforme	LC 26-060
Stabilité (N) (min)	14619	conforme	14133	9000	conforme	LC 26-060
Densité maximale	2.561		2.534			LC 26-045
Densité brute	2.437		2.348			LC 26-040
Vides (%)	4.80	conforme	7.34	2.0-5.0	non conforme	LC 26-320
VAM comblé (%max)	73.40	conforme	62.16	85.0	conforme	LC 26-900
Compacité (%min)	95.2	conforme	92.6	93.0	non conforme	LC 26-320

La lecture des résultats d'essais effectués sur les éprouvettes d'enrobés confectionnées avec un pourcentage de 60% d'abrasifs de Granby lavés, permet de conclure que le mélange 1 testé conviendrait à une utilisation prévue pour un enrobé bitumineux de classe EB-10S, selon les exigences des enrobés formulés selon la méthode Marshall et illustrées en Annexe VIII. Le même procédé pourrait également être utilisé pour un autre type d'enrobé tel qu'un EB-14 ou un EB-10C de la nomenclature des enrobés du MTQ, en variant les proportions des différents calibres.

4.6.3 Formulation selon la méthode LC

Les échantillons soumis à cette formulation proviennent des tas GTL, abrasifs lavés et nettoyés de Gatineau, identifiés dans le Paragraphe 3.3.4

La démarche consiste à intégrer 35 % d'abrasifs dans une formulation de GB-20. Le choix de cette proportion est évidemment lié au souci de maximiser le taux de réutilisation. Une combinaison des différents granulats permet d'optimiser les pourcentages d'abrasifs et de pierre de calibre 5-10 afin d'intégrer le fuseau exigé dans le tableau 4202-1 de la norme 4202

du Ministère des Transports du Québec pour un enrobé de type GB-20. La granulométrie est ainsi ajustée pour satisfaire les zones de restriction.

L'incorporation d'un filler dans la formulation est nécessaire. Le fuseau granulométrique combiné est présenté dans le Tableau 4.15. Le bitume utilisé est de classe 64-34. Ses caractéristiques sont définies dans le tableau 4101-1 de la norme 4101 du Ministère des transports du Québec. C'est un bitume habituellement utilisé dans la région de Gatineau au regard de la résistance à la fissuration thermique.

Tableau 4.15 Combiné granulométrique d'un GB-20 contenant 35 % d'abrasifs

Tamis (mm)	**10-14 mm DJL, St-Philippe 15%**	**14-20 mm DJL, St-Philippe 15%**	**5-10 Raycar 30%**	**Pierre abrasive GTL, Gatineau 35 %**	**Filler 5%**	**Fuseau GB-20**	**Combiné ÉTS**
28	100	100	100	100	100	100	100
20	100	96	100	100	100	95 - 100	99
14	84	12	100	100	100	67 - 90	84
10	4	2	93,5	100	100	52- 75	69
5	2	2	8,2	99	100	35 - 50	43
2,5	2	2	1,9	80	100		34
1,25			1,4	62	100		27
0,63			1,4	48	100		22
0,315			1,3	32	99		16
0,16			1,3	14	93		10
0,08			1,2	2,4	79	4,0 - 8,0	5
D brute	2,692	2,69	2,813	2,6899	2,7		
D apparente	2,709	2,703	2,943	2,7328	2,775		
% absorption	0,62	0,5	1,57	0,5833	1		

Formulation à l'aide de la presse de cisaillement giratoire selon la méthode LC

Les proportions de classes granulaires permettent de calculer les caractéristiques des granulats entrant dans la composition de l'enrobé. Il s'agit de la valeur de la densité brute du granulat combiné $d_{gb,}$ du pourcentage d'eau absorbé par le granulat P_e, de la densité effective du granulat d_{ge} et du pourcentage de bitume absorbé P_{ba}.

Une nouvelle teneur en bitume initiale P_{bi} pour la formulation de l'enrobé est ensuite calculée pour l'obtention d'une nouvelle densité maximale d_{mm}, nécessaire pour le calcul de la masse d'enrobé à utiliser pour effectuer l'essai. La valeur de P_{bi} est de 4,48 %.

L'essai à la presse à cisaillement giratoire est effectué selon la méthode d'essai LC 26-003 sur une éprouvette d'enrobé. La masse d'enrobé considérée est de 5 188,20g. La teneur en bitume étant de 4,48 %, les granulats et le bitume sont pesés dans les proportions suivantes : Bitume 64-34 : 232,40g ; classe 14/20 : 743,37g ; classe 14/10 : 743,37g ; classe 5/10 : 1486,74g ; abrasif : 1734,53g ; filler : 247,79g.

La température des granulats est portée à 168°C et celle du bitume à 160°C. Les accessoires servant à l'essai, tels que les cylindres de moulage, le bol à malaxage et le récipient verseur sont placés à l'étuve chauffée, à la même température que les granulats.

Les granulats chauffés et secs sont ensuite placés dans le bol de malaxage et le tout homogénéisé manuellement. Le mélange est déposé dans l'étuve à la température de 160 °C. L'enrobé est par la suite déposé dans le cylindre de moulage préalablement chauffé et placé sur le plateau de la PCG. L'angle d'inclinaison de 1,25° est appliqué sur le cylindre. Le vérin de compactage est descendu en appliquant une pression de 600 kPa. La Figure 4.26 montre l'introduction du cylindre de moulage de GB-20 dans la PCG.



Figure 4.26 Introduction du cylindre de moulage de GB-20 dans la PCG

L'enrobé est compacté jusqu'à 200 girations. Les mesures de hauteur pour chaque giration sont automatiquement enregistrées. Deux éprouvettes supplémentaires sont préparées pour compléter l'essai. Le Tableau 4.16 illustre les résultats obtenus pour les trois essais.

Tableau 4.16 Résultats des compactions à la PCG

V5.01	**Blend 1**						
Gyration Number	**GB-20 4,48 %(64-34) Essai 1 (mm)**	**GB-20 4,48 %(64-34) Essai 2 (mm)**	**GB-20 4,48 %(64-34) Essai 3 (mm)**	**Vi 1**	**Vi 2**	**Vi 3**	**Norme Tableau 4202-1**
10	132,7	131,9	131,8	13,34	12,81	12,75	≥ 11,0
120	120,9	120,6	119,9	4,88	4,64	4,09	4,0 - 7,0
200	119,2	118,9	118,3	3,52	3,28	2,79	≥ 2,0

Le pourcentage de vides interstitiels dans les trois essais de l'enrobé pour chacun des nombres de girations (10g, 120g, 200g) est conforme aux exigences du tableau 4202-1 de la norme 4202.
Pour chacun des nombres de giration nécessaires, la moyenne du pourcentage des vides interstitiels dans l'enrobé répond aux exigences de la norme.
La formulation est donc considérée terminée et la teneur en bitume initiale de 4.48 % devient la teneur en bitume totale P_b.

Résistance à l'orniérage

Le second niveau de formulation de l'enrobé est la vérification de sa résistance à l'orniérage en laboratoire. L'appareillage illustré à la Figure 4.27 permet de vérifier l'aptitude de l'enrobé à résister aux déformations de type orniérage



Figure 4.27 Orniéreur, laboratoire des enrobés à l'ÉTS

Les éprouvettes sont fabriquées selon les spécifications de l'enrobé au laboratoire de l'ÉTS. Les dimensions des éprouvettes sont de 500 mm x 180 mm x 100 mm. Elles sont compactées à une valeur de 95 %. Les éprouvettes subissent ensuite un curage de 48 heures à la

température de la pièce avant l'essai à l'orniéreur. La préparation des éprouvettes suit la méthode d'essai LC 26-400 « Fabrication d'éprouvettes à l'aide du compacteur LCPC ».

Les mesures de profil initial sont relevées aux 15 emplacements prédéterminés et les éprouvettes sont fixées dans l'orniéreur. 1 000 cycles sont d'abord effectués à froid et des mesures sont enregistrées. Ensuite, les éprouvettes sont conditionnées à une température de 60 °C pendant 12 heures avant la reprise de l'essai. Des lectures sont relevées à 100, 300, 1 000, 3 000, 10 000 et 30 000 cycles.

L'essai a été interrompu car une des deux éprouvettes a présenté à 3 000 cycles, une profondeur d'ornière supérieure à 15 mm, conformément à la méthode d'essai LC 26-410 « Résistance à la déformation des enrobés à l'essai d'orniérage ». Les résultats des relevés sont présentés en Annexe VIII.

4.6.4 Résultats et discussion

Le premier mélange bitumineux formulé et produit est un enrobé EB 10-S avec un apport atteignant 60% d'abrasifs. L'enrobé contenant 4.8% de bitume, qui est la teneur minimale de bitume requise, se comporte très bien, avec 3,69 mm de fluage et une stabilité Marshall de 14 000N. Le second mélange formulé est un enrobé GB 20 avec un apport de 35% d'abrasifs. Quoique les deux formulations, aient passé les exigences des normes associées à la compacité, la seconde formulation a échoué aux exigences de la norme associée à l'orniéreur, selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées du MTQ.

4.7 Synthèse

Les différentes phases expérimentales réalisées dans le cadre de cette recherche permettent de tirer les enseignements suivants :

La comparaison des caractérisations des résidus de Gatineau de 2012 et de 2013 permet de déduire que pratiquement, les abrasifs épandus se comportent de la même manière d'une année à l'autre. Il est permis d'affirmer qu'au niveau de la contamination, l'exposition de ces abrasifs à l'environnement des chaussées, les a contaminés aux hydrocarbures C_{10}-C_{50} et à certains métaux, principalement le zinc, qui est présent à des teneurs non négligeables pour les deux campagnes de caractérisation, ainsi que le cuivre et le plomb. L'action du lavage a permis de réduire la quantité de ces contaminants, mais leur teneur demeure toutefois, au dessus du critère générique A pour ces métaux.

Il est permis de conclure également que toutes les classes granulométriques constituant les résidus de balayage, sont exposées aux métaux. Il est vrai que les fuseaux granulométriques 630 µm / 2,5 mm et < 80 µm ont un plus fort potentiel de fixation, mais globalement, toutes les classes sont exposées. De ce fait, le tamisage à sec ne parait pas une solution en ce qui a trait à la décontamination des métaux.

De plus, le tamisage à sec, testé au laboratoire sur les échantillons de 2012, n'a pas suffi à nettoyer les abrasifs des matières organiques. Ces matières, d'origine animale ou végétale, restent collées aux parois des granulats même après un tamisage énergique, reproduit par un tamiseur mécanique. Seule l'action combinée de l'eau et du tamisage parait efficace pour réduire l'indice colorimétrique.

Les abrasifs de Granby quant à eux, sont essentiellement contaminés aux hydrocarbures C_{10}-C_{50} et à certains HAP.

Le procédé d'hydrocyclonnage utilisé lors de cette recherche pour laver les résidus, répond essentiellement à un double objectif : nettoyer les granulats des matières organiques et réduire les fines (< 63µm).

Néanmoins, il parait possible de valoriser les abrasifs sans avoir recours à l'hydrocycloneur, en les tamisant et en les lavant sur un site industriel par exemple, en autant qu'ils soient

propres (exempts de toutes matières animale ou végétale et de particules fines) et répondent aux exigences techniques, avant leur réutilisation.

Les résultats des essais permettent de classer les abrasifs dans la catégorie 3 des «lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille ». Cette classification ouvre la voie à un certain nombre de possibilités de réutilisation d'autant plus que leur potentiel de lixiviation est faible.

Sur le plan physique, l'analyse du comportement des abrasifs montre une dégradation de leurs propriétés intrinsèques. Cependant, la granularité des abrasifs lavés permet de les classer dans le fuseau AB-10 de la norme NQ 2560-114-VI/2002. Ils sont de ce fait, adaptés pour les abrasifs composés de granulats concassés. Quant à l'exigence de la teneur en eau, la satisfaction du taux maximal d'humidité contenue dans les abrasifs, ne devrait pas poser de contraintes pratiques.

Les taux d'usure et de friabilité des abrasifs lavés affichent des résultats en dessous de 30 %, permettant ainsi de les classer dans la catégorie 1 des granulats fins selon le tableau 4 de la norme NQ 2560-114-I/2002. Leur coefficient d'écoulement est de l'ordre de 89. Ils sont de ce fait, conformes aux exigences des tableaux 2 et 3 de la même norme.

Pratiquement et selon le tableau A1 de la norme citée précédemment, les abrasifs de Gatineau et de Granby, échantillonnés après lavage, pourraient convenir à la confection d'enrobés à chaud et à froid pour les couches de base, les couches de correction, les couches de surface pour tous types de chaussées, en surfaçage, en constructions neuves ou en reconstruction.

À cet effet, les deux applications en enrobés testées montrent une voie prometteuse dans ce domaine d'utilisation en particulier, malgré l'échec de l'essai à l'orniéreur. Il convient de procéder à d'autres essais avec une autre formulation, de façon à optimiser la granulométrie.

Ce qui est certain, c'est que ce sont des granulats naturels provenant de carrières ou de sablières auxquels sont venus se greffer des résidus de toutes sortes. Le balayage contribue grandement au mélange des granulats d'abrasifs avec les résidus organiques, végétaux ou animaux et les poussières. Il n'en demeure pas moins que c'est le seul moyen de ramassage efficace qui existe actuellement. Il parait donc plausible de les catégoriser comme étant des granulats naturels qu'il faudra simplement nettoyer pour ensuite les réutiliser comme abrasifs pour un autre hiver, ou les intégrer dans des enrobés ou dans un matériau granulaire.

CHAPITRE 5

ÉVALUATION ÉCONOMIQUE ET ÉTUDE COMPARATIVE

L'objectif de cette étape est d'évaluer dans un premier temps, de façon sommaire, les coûts induits par le nettoyage des résidus à l'hydrocycloneur, comparativement aux coûts de l'enfouissement. L'opération de nettoyage concerne les abrasifs de Gatineau pour la campagne hivernale de 2013. Dans un second temps, il s'agit de comparer par analyse multicritères, plusieurs options de réutilisation des abrasifs pour fournir une visibilité lors de la prise de décision relative à la gestion des abrasifs. Les différentes options de réutilisation découlent des lignes directrices.

5.1 Estimation des coûts de nettoyage et d'enfouissement

Les coûts de l'abrasif destiné à l'enfouissement dans un centre d'enfouissement sont comparés aux coûts du même produit, issu d'un balayage, et soumis à un nettoyage pour être réutilisé. Cette estimation par les coûts variables permet de répondre à plusieurs objectifs, notamment :

- juger la performance de la décision prise;
- apprécier la profitabilité globale de l'opération de nettoyage et de réutilisation des abrasifs.

Il s'agit d'abord d'estimer les quantités des divers matériaux inclus dans le cycle de vie des abrasifs, de l'achat des abrasifs neufs au lavage de ces matériaux, en passant par les opérations d'épandage, de balayage, de transport et de nettoyage. La seconde étape consiste à évaluer les coûts qui sont associés à toutes ces opérations. Enfin, la troisième étape évalue le rapport entre la réutilisation des abrasifs et leur enfouissement, pratiqué jusque là par la plupart des administrations du Québec.

Durant l'hiver 2012-2013, 898 tonnes d'abrasifs sont épandues sur le réseau du MTQ de la région de Gatineau. 610 tonnes sont récupérées à l'issue de la campagne de balayage du printemps 2013. Cela représente un taux relatif de récupération par balayage de 68%, auquel il faut retrancher une quantité de matériaux représentant divers débris.

Une quantité de 510 tonnes est disposée dans un centre d'enfouissement de Lachute. Les quelques cent tonnes restantes sont acheminées vers une sablière de la région de Bromont pour leur nettoyage. Le coût associé à leur transport est de 9.46$/t.

Le Tableau 5.1 résume les quantités de matériaux mises en œuvre lors de ces opérations. Le Tableau 5.2 résume les coûts qui y sont associés.

Tableau 5.1 Quantités de matériaux mis en œuvre durant la saison 2012-2013

Description	**Quantités (tonne)**	**Taux (%)**
Abrasifs épandus	898	100
Résidus récupérés	610	68
Perte	288	32
Résidus enfouis	510	57
Résidus destinés au lavage	98	11

Tableau 5.2 Quantités et coûts associés aux opérations de lavage et d'enfouissement

Étapes	Description	Quantités (t)	Coût unitaire $	Coût total $
Achat d'abrasifs	Abrasifs neufs		16,25	
Enfouissement	Enfouissement - coûts directs		30	
	Caractérisation avant enfouissement	n échantillons	405	
	Coûts indirects- impacts environnementaux			
Tamisage et lavage	Tamisage et lavage des résidus	98	3	338
	Caractérisation des matériaux lavés	2 échantillons	405	810
	Coût du transport au site de lavage	98	9,46	927
	Coût total du nettoyage		21,16	2 074

L'analyse de ces données renseigne d'abord sur la proportion des abrasifs recueillis après un tamisage et un lavage qui avoisine 90 % des résidus ramassés. C'est un taux intéressant d'autant plus que ce sont des granulats dont les caractéristiques les classent dans les matériaux potentiellement réutilisables.

L'analyse de ces données renseigne également sur le poids de la caractérisation dans le coût total de la mise en valeur des abrasifs. En effet, un essai de caractérisation chimique coute en moyenne 405 $, ce qui représente 40 % du coût total du nettoyage. Le coût pris en compte dans ce chapitre concerne uniquement la caractérisation des abrasifs lavés. Le coût lié aux abrasifs non lavés sera pris en compte dans le cas de l'enfouissement, opération obligatoire avant la mise à disposition dans un centre d'enfouissement.

Le coût du transport se situe dans les mêmes proportions. Quoique, dans ce cas précisément, il soit exceptionnel que des résidus soient transportés sur une distance de 280 km pour subir un lavage. C'est donc un coût qu'il faut relativiser.

Concernant l'enfouissement, le coût direct de l'enfouissement varie de 30 $ la tonne métrique pour les sables de rue à plus de 300 $ la tonne métrique pour les matières résiduelles, dépendamment de la nature et du degré de contamination (www.ridl.ca). Le coût considéré est de 30$. Il représente le coût minimal relevé sur le site internet d'un centre d'enfouissement (www.ridl.ca).

À cela, il faut ajouter les coûts de la caractérisation et du transport. De plus, il faut aussi ajouter les coûts indirects qui sont associés à l'enfouissement des résidus de balayage, tels que les impacts environnementaux. L'évaluation des coûts indirects liés aux impacts sur l'environnement de l'enfouissement des résidus de balayage requiert des données qui ne sont présentement pas disponibles. Ces coûts, qui sont d'ailleurs les plus bas en Amérique du Nord, sont appelés à augmenter en prévision de la raréfaction des espaces alloués à l'enfouissement. Ces facteurs pourraient accroitre encore plus la facture de l'enfouissement.

En conclusion, il apparait compte tenu des facteurs énumérés précédemment et des résultats de l'évaluation sommaire, que la réutilisation des abrasifs représente l'option la plus avantageuse des points de vue économique et environnemental par rapport à leur enfouissement. L'opération de lavage et de tamisage est rentable même pour des quantités aussi faibles que celles utilisées dans le cadre de cette étude par rapport à l'enfouissement.

Il y a lieu de souligner toutefois que certains coûts liés aux essais de caractérisation peuvent être réduits. En effet, la caractérisation systématique au vu des campagnes qui ont été menées depuis de nombreuses années par le Ministère des Transports du Québec, révèle des taux et des modes de contamination similaires. Il ne parait donc pas pertinent de recourir à des caractérisations systématiques, d'autant plus que les coûts associés à ces opérations sont importants.

5.2 Analyse multicritère

Cette analyse a pour but d'offrir une vision aux gestionnaires des matières résiduelles et des abrasifs. L'analyse peut être considérée comme un outil d'aide à la décision, considérant des aspects quantitatifs et qualitatifs complexes. Deux méthodes sont généralement utilisées lors d'une analyse multicritère (Bruxelle, 2015). Il s'agit de la méthode de la somme pondérée (WSM) ou de la méthode d'analyse multicritère hiérarchique (AHP). La première considère une résolution d'alternatives à une seule dimension. La seconde procède par des combinaisons binaires de chaque niveau de la hiérarchie par rapport aux éléments du niveau supérieur (Bruxelle, 2015).

La section suivante présente la méthode de la somme pondérée pour le choix d'alternatives de réutilisation des abrasifs. Elle considère six choix de réutilisation des abrasifs, les plus en vue dans le domaine des matériaux granulaires. Elle ne tient pas compte dans ce cas-ci des retombées économiques. Elle s'intéresse uniquement aux volets pratique, fonctionnel et environnemental. La méthodologie adoptée pour réaliser cette analyse multicritère consiste à considérer deux paramètres : le classement et la notation.

Le classement attribue un rang à chaque élément de décision en fonction du degré d'importance dans la décision à prendre. La notation, quant à elle, consiste à attribuer une note de 1 à 5 en rapport avec son degré d'importance dans la décision à prendre.

5.2.1 Critères de choix de réutilisation des résidus d'abrasifs

Les différentes alternatives de réutilisation prises en compte sont les suivantes :

- réutilisation en tant qu'abrasifs pour un second épisode hivernal;
- utilisation dans les enrobés par incorporation des abrasifs dans le mélange bitumineux;
- utilisation dans les bétons ordinaires par incorporation dans la formulation de bétons;

- utilisation dans les matériaux granulaires de type MG20 par incorporation des abrasifs dans le mélange granulaire;
- enfouissement dans les centres d'enfouissement autorisés;
- valorisation des abrasifs comme matériaux de recouvrement journalier.

5.2.2 Critères de sélection ou attributs

Les critères de sélection pris en considération sont les aspects suivant lesquels les alternatives sont examinées. Ce sont: la stabilisation des contaminants, l'affinité avec le milieu récepteur, la préparation des matériaux, les exigences techniques ainsi que l'incidence de la méthode choisie sur le développement durable.

Stabilisation des contaminants: Il s'agit de l'incidence potentielle du procédé envisagé sur la mobilité des contaminants dans la matrice réceptrice. Les liants hydrauliques et hydrocarbonés favorisent a priori la stabilisation des contaminants. À l'inverse, sous différentes contraintes, l'absence d'un liant permettrait le déplacement des contaminants.

Affinité avec le milieu récepteur : inclut le comportement des granulats physiques dans le milieu récepteur en fonction des caractéristiques physiques et chimiques. L'affinité du milieu récepteur avec les granulats d'abrasifs favorise l'intégration de ces derniers. L'affinité dépend de la similitude des propriétés des composants du milieu récepteur avec les propriétés des matériaux. Il est clair que les domaines de réapplication envisagés dans ce Paragraphe emploient tous des matériaux granulaires. Cependant, la teneur en hydrocarbures des abrasifs lavés leur permet potentiellement, par affinité, une meilleure intégration dans les enrobés comparativement aux bétons ordinaires.

Contraintes liées à la préparation : Ce sont les contraintes liées à la préparation des granulats abrasifs. Le nettoyage des résidus fait partie de cette préparation dans le cas d'une réutilisation dans les enrobés ou dans les bétons. Le nettoyage des résidus n'est toutefois pas nécessaire s'ils devaient être enfouis. La préparation pourrait être plus délicate dans le cas d'une réutilisation dans les bétons. Il s'agit dans ce cas précisément de s'assurer que les taux

d'hydrocarbures n'influent pas sur les réactions chimiques présentes dans une matrice de béton.

Exigences techniques: Il s'agit de s'assurer dans ce cas, que les matériaux abrasifs répondent aux exigences techniques des matériaux qu'ils remplaceront. Ce sont des exigences liées à leurs propriétés intrinsèques et de résistance ainsi que des exigences liées à leur contamination.

Incidence sur le développement durable : inclut la valeur ajoutée de l'usage considéré concernant le développement durable en adéquation avec la politique québécoise de gestion des matières résiduelles, et spécialement la stratégie des 3R-V-E.

5.2.3 Analyse par paires

Cette analyse permet de hiérarchiser analytiquement les composantes importantes entrant dans l'arbre de décision. Chaque indicateur est comparé successivement avec les autres indicateurs de sorte à fournir un jugement simple concernant la signification de chacun des indicateurs.

L'analyse par paires, tel que présentée dans le Tableau 5.3, montre une prévalence des paramètres liés à l'environnement et au développement durable. La stabilisation des contaminants est de toute évidence une préoccupation que cette thèse soulève. En parallèle, l'objectif de réutiliser les abrasifs, même contaminés, rend leur préparation, prioritaire, au même titre d'ailleurs que la satisfaction aux exigences techniques.

Il va de soi que conformément aux conclusions tirées du Paragraphe précédent, toute réutilisation potentielle des matériaux abrasifs, requiert un nettoyage convenable préalable. Cette analyse par paires reproduit donc l'esprit dans lequel cette recherche a évolué.

Tableau 5.3 Comparaison par paires des critères d'évaluation

	Stabilisation S	**Affinité A**	**Préparation P**	**Exigences E**	**Développement durable D**	**Nombre**	**Total**	**Poids %**
Stabilisation S						2	2/10	20 %
Affinité A	S					1	1/10	10 %
Préparation P	S	P				2	2/10	20 %
Exigences E	E	A	E			2	2/10	20 %
Développement durable D	D	D	P	D		3	3/10	30 %
Total						10		100%

5.2.4 Analyse multicritère

L'analyse multicritère est détaillée dans le Tableau 5.4. L'échelle de notation porte 5 valeurs de 1 à 5.

- 1 correspond à très bon;
- 2 à bon;
- 3 à moyen;
- 4 à mauvais;
- 5 à très mauvais.

Le premier choix se porte sur la valeur qui se rapproche de 1.

Tableau 5.4 Analyse multicritère des différents scénarios de réutilisation possible

Critères	Pondération	Réutilisation possible											
		Abrasifs		Enrobés		Bétons ordinaires		Matériaux granulaires		Valorisation		Enfouissement	
		R	Note	R	Note	R	Note	R	Note	R	Note	R	Note
Stabilisation	20%	5	1	1	0,2	1	0,2	3	0,6	5	1	5	1
Comportement	10%	1	0,1	1	0,1	3	0,3	2	0,2	2	0,2	1	0,1
Préparation	20%	2	0,4	3	0,6	4	0,8	3	0,6	1	0,2	1	0,2
Exigences	20%	2	0,4	2	0,4	3	0,6	2	0,4	1	0,2	1	0,2
Développement durable	30%	2	0,6	1	0,3	1	0,3	1	0,3	4	1,2	5	1,5
			2,5		1,6		2,2		2,1		2,8		3

L'analyse classe la réutilisation des abrasifs dans un mélange d'enrobés bitumineux en première position. Ainsi, cette éventualité représente un choix de qualité eu égard à tous les critères d'évaluation considérés.

Sur les plans chimique et environnemental, la présence de liants hydrocarbonés ou hydrauliques procure a priori aux abrasifs, une stabilisation de leurs contaminants. C'est le cas des bétons et des enrobés. À l'inverse, l'absence d'un liant ne favoriserait pas potentiellement cette stabilisation.

En matière de préparation, les abrasifs doivent subir un nettoyage à l'hydrocyclonneur dans le cadre d'une application en enrobés; ce qui n'est évidemment pas le cas d'un enfouissement, où il n'y a pas nécessité de nettoyer.

Les abrasifs nettoyés répondent parfaitement aux exigences techniques des normes en vigueur au Québec quant aux matériaux granulaires entrant dans la composition d'un enrobé. De plus, l'affinité que représente le milieu récepteur avec les caractéristiques des granulats, notamment leur taux d'hydrocarbures ne présente pas de contraintes particulières. Ceci explique la note 1 obtenue dans ce volet.

Enfin, en ce qui concerne l'incidence sur le développement durable, il apparait que la réutilisation des abrasifs en enrobés, justifie la position de choix obtenue, compte tenu du caractère de substitution d'un nouveau granulat, ressource non renouvelable, qu'est la roche. Ceci vaut également pour la réutilisation en bétons ou en matériaux granulaires.

Il est clair que toute réutilisation dans un mélange par substitution, permettrait de réduire la production de nouveaux granulats. Ce qui n'est pas le cas de l'enfouissement où l'investissement consenti devient inévitablement une perte.

La valorisation, dans une moindre mesure, permet de tirer parti de ces abrasifs s'ils sont utilisés comme matériaux de recouvrement journalier. Et là encore, d'autres matériaux moins nobles que la roche, pourraient remplir cette tâche.

Cette analyse permet aussi de statuer sur le cas de la réutilisation comme abrasifs pour un second hiver. Il apparait, que ce choix obtient un score inférieur à l'application dans les enrobés ou dans les bétons et autres matériaux granulaires de type MG 20. Ceci s'explique par le fait que malgré sa conformité aux directives de la politique québécoise de gestion des matières résiduelles, il n'en demeure pas moins que compte tenu du comportement des abrasifs sur leur cycle de vie, notamment l'évolution de leurs propriétés intrinsèques, une seconde réutilisation pourrait réduire considérablement leurs performances, au risque de les perdre indéfiniment.

CONCLUSION

Cette thèse expérimentale a permis d'identifier et de valider une solution valable et utile d'une part mais aussi pratique et économique qui permet de réutiliser des millions de tonnes de matériaux granulaires d'abrasifs épandus chaque année au Québec, lesquels sont épandus pour assurer la sécurité des transports en période hivernale.

Cette initiative repose sur la *Politique québécoise de gestion de matières résiduelles* qui s'y applique puisqu'il s'agit de réutilisation des ressources naturelles exploitées.

La thèse dresse un résumé succinct de l'état de l'art encore que celui-ci est plutôt limité sur ce sujet et a permis de mettre en évidence et de comparer, pour une première fois, certaines caractéristiques physiques et chimiques des abrasifs avant et après un cycle hivernal.

Elle a également permis d'identifier une solution valable et pratique de décontamination rendant les abrasifs récupérés, après un cycle hivernal, aptes à une réutilisation au sein de la D.T du MTQ de l'Outaouais ainsi de la ville de Granby, ce qui en soi permet au moins de poser l'hypothèse que l'approche pourrait avoir une application plus répandue au sein des autres administrations routières en charge de l'entretien hivernal.

La thèse rapporte donc le protocole d'échantillonnage pour assurer la représentativité des prélèvements, et évalue par la suite la nature et le degré de la contamination des abrasifs récupérés au sein de la ville de Granby et de la DT de Gatineau (MTQ).

Elle situe la contamination au sein du milieu récepteur qui est la chaussée. Les contaminants donc qui se retrouvent dans les abrasifs après un cycle hivernal, sont tributaires de ceux qui se retrouvent sur la chaussée.

Ceci permet donc déjà de conclure que permettre de recycler un enrobé doit automatiquement permettre de recycler un abrasif, puisqu'ils sont soumis aux mêmes contaminants.

Dans cet esprit, la caractérisation chimique des prélèvements effectués dans deux régions administratives et géologiques différentes du Québec, permet donc de constater et d'asseoir peut-être la similitude de la nature de leur contamination, et de justifier d'en poser au moins l'hypothèse pour considération future dans d'autres travaux.

Et c'est là une autre contribution. En effet, il ressort de l'analyse expérimentale que l'exposition de ces abrasifs à l'environnement des chaussées les a contaminés aux hydrocarbures C_{10}-C_{50} et à certains métaux, principalement le zinc, le cuivre et le plomb. Cette étude expérimentale pionnière a également révélé que la répartition des métaux concernait toutes les fractions granulaires des résidus mais toutefois avec une prédominance marquée pour les fines < 80 µm et le fuseau 630 µm-2.5 mm. Cette thèse a finalement dégagé que les abrasifs sont également contaminés par des matières organiques, animales et végétales et des poussières, d'où encore la nécessité de les nettoyer avant réutilisation.

La thèse rapporte aussi l'évolution des propriétés intrinsèques et mécaniques des abrasifs après leur nettoyage.

Il en ressort que les propriétés intrinsèques des abrasif se dégradent principalement à cause d'une transformation de leur fuseau granulométrique qui rétrécit, laquelle résulte des efforts principalement de compression entre le passage du trafic et la chaussée, notamment sous l'effet combiné du passage des roues des véhicules et de plusieurs autres paramètres tels que l'eau et le contact avec d'autres matériaux.

Il n'en demeure pas moins que, sous toutes réserves de la taille des échantillons et de leur représentativité, les analyses permettent de conclure qu'ils conservent des propriétés

mécaniques qui les classent dans la catégorie 1 des matériaux fins de la norme NQ 2560-11 /2002.

La granularité des abrasifs récupérés et lavés a permis de les classer dans le fuseau AB-10 de la norme NQ 2560-114-VI/2002 et établit qu'ils sont adaptés pour être réutilisés comme abrasifs composés de granulats concassés, pour un autre cycle hivernal.

De plus, les résultats des essais effectués dans le cadre de cette étude expérimentale permettent de classer les abrasifs dans la catégorie 3 des «Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille ».

Cette classification ouvre donc la voie à un certain nombre de possibilités de réutilisation d'autant plus qu'il ressort dans cette analyse expérimentale que leur potentiel de lixiviation est faible, tel que ceci a été établi dans cette thèse, en accord, par ailleurs, avec l'état de l'art.

Enfin la thèse s'est penchée sur les différentes possibilités de réutilisation des abrasifs en accord avec les lois, les normes et les règlements en vigueur au Québec, et a dégagé deux applications possibles dans les mélanges bitumineux.

Le premier mélange bitumineux formulé et produit est un enrobé EB 10-S avec un apport atteignant 60% d'abrasifs, qui se comporte très bien selon la méthode Marshall encore en usage courant dans le milieu municipal y compris la Ville de Granby, commanditaire de cette thèse.

Le second mélange formulé et produit est un enrobé GB 20 avec un apport de 35% d'abrasifs. Quoique les deux formulations aient passé les exigences des normes associées aux essais de compression, la seconde formulation a échoué aux exigences de la norme associée à l'orniéreur, selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées du MTQ, également commanditaire de cette thèse.

Il n’en demeure pas moins qu’avec des teneurs moindres, la réutilisation dans les enrobés demeure une alternative économiquement supérieure et beaucoup plus avantageuse que l’enfouissement.

RECOMMANDATIONS

La recommandation principale de cette thèse est de poursuivre l'étude de validation selon le protocole établi dans cette thèse et de voir à intégrer cette solution prometteuse dans le cadre des lignes directrices de gestion des matières résiduelles et la norme NQ-25-60-600 traitant du recyclage des matériaux.

Cette thèse recommande également d'engager une réflexion et une étude sur les impacts environnementaux liés à l'enfouissement des résidus de balayage et les coûts qui leur sont directement ou indirectement associés, en vue d'aboutir à une évaluation économique et environnementale qui intègrerait tous les paramètres pertinents.

Elle recommande en outre, de passer à un projet réel d'expérimentation en identifiant un projet de réfection d'une chaussée et en optimisant les proportions de réutilisation des abrasifs.

Cette thèse recommande enfin aux administrations de se doter d'hydrocyclonneurs, ou le cas échéant, d'encourager les exploitants de carrières et de sablières à s'en équiper pour leur efficacité éprouvée en réduction de fines < 63 μm.

ANNEXE I

SYNTHÈSE DES FUSEAUX GRANULOMÉTRIQUES

Tableau-A I-1 Synthèse des fuseaux granulométriques

Tamis (CCMM)	Mesures américaines	Québec BNQ						Colombie britannique						Montana		Oregon	
		AB10 M min	AB10 M max	AB 5 min	AB 5 max	AB10 min	AB10 max	12,5 min	12.5 max	16 min	16 max	19 min	19 max	min	max	6,75 min	6.75 max
19	3/4 po											100	100				
16	5/8 po									100	100						
12,5	1/2 po							100	100								
9,5	3/8 po									80	100	80	100			100	100
10		100	100			100	100										
8				100	100												
7,94	5/16 po													100	100		
6,75	1/4 po															80	100
5		50	100	85	99	95	100										
4,75	No 4							50	95	50	95	50	95				
2,5		0	40	1	15												
2,36	No 8							30	80	30	80	30	80				
2	No 10													20	60		
1,5																8	22
1,25		0	10	0	5	0	70										
1,18	No 16																
0,63						0	50										
0,6	No 30							10	50	10	50	10	50				
0,425	No 40													0	30		
0,375																0	10
0,315						0	35										
0,3	No 50							0	25	0	25	0	25				
0,18	No 80																
0,16						0	15										
0,15	No 100																
0,08		0	15			0	5										
0,075	No 200							0	6	0	6	0	6	0	10	0	2

ANNEXE II

CRITÈRES GÉNÉRIQUES A, B, C DES SOLS

Tableau-A II-1 Critères génériques A, B, C des sols pour la province géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent
Tiré de MDDEP (1998)

GRILLE DES CRITÈRES GÉNÉRIQUES POUR LES SOLS			
	CRITÈRES DE SOL mg/kg de matière sèche ppm		
	A	B	C
Métaux (et Metalloïdes)			
Argent (Ag)	2	20	40
Arsenic (As)	6	30	50
Baryum (Ba)	200	500	2 000
Cadmium (Cd)	1,5	5	20
Cobalt (Co)	15	50	300
Chrome (Cr)	85	250	800
Cuivre (Cu)	40	100	500
Étain (Sn)	5	50	300
manganèse (Mn)	770	1 000	2 200
Mercure (Hg)	0,2	2	10
Molybdène (Mo)	2	10	40
Nickel (Ni)	50	100	500
Plomb (Pb)	50	500	1 000
Sélénium (Se)	1	3	10
Zinc (Zn)	110	500	1 500
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)- Groupe V du RPRT			
Acénaphtène	0,1	10	100
Acénaphtylène	0,1	10	100
Anthracène	0,1	10	100
Benzo (a) anthracène	0,1	1	10
Benzo (a) pyrène	0,1	1	10
Benzo (b) fluoranthène	0,1	1	10

GRILLE DES CRITÈRES GÉNÉRIQUES POUR LES SOLS			
	CRITÈRES DE SOL mg/kg de matière sèche ppm		
	A	B	C
Benzo (j) fluoranthène	0,1	1	10
Benzo (k) fluoranthène	0,1	1	10
Benzo (b+j+k) fluoranthène	0,1	1	10
Benzo © phénanthrène	0,1	1	10
Benzo (g,h,i) pérylène	0,1	1	10
Chrysène	0,1	1	10
Dibenzo (a,h) anthracène	0,1	1	10
Dibenzo (a,i) pyrène	0,1	1	10
Dibenzo (a,h) pyrène	0,1	1	10
Dibenzo (a,l) pyrène	0,1	1	10
7,2- Diméthylbenzo (a) anthracène	0,1	1	10
Fluoranthène	0,1	10	100
Fluorène	0,1	10	100
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	0,1	1	10
3-Méthylcholanrothrène	0,1	1	10
1-Méthylnaphtalène	0,1	1	10
2-Méthylnaphtalène	0,1	1	10
1,3- Diméthylnaphtalène	0,1	1	10
2,3,5-Triméthylnaphtalène	0,1	1	10
Naphtalène	0,1	5	50
Phénanthrène	0,1	5	50
Pyrène	0,1	10	100
Méthylnaphtalènes (chacun)	0,1	1	10
Hydrocarbures pétroliers C_{10} à C_{50}			
Méthylnaphtalènes (chacun)	300	700	3 500

ANNEXE III

RÉSULTATS DES ESSAIS CHIMIQUES 1

Tableau-A III-1 Taux de zinc (Zn) et ce cuivre (Cu) dans les échantillons fractionnés GTN, GTA et GTB de Gatineau

Critères de Zinc (Zn)				
	A	B	C	RESC
mg/kg	110	500	1500	7500

	Echantillon		A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B 3	C1
Concentrations en Zn (mg/kg)	0/5	mm	159,16	155,55	228,61	127,51	150,22	194,48	149,32	99,89	9,31
	5	mm	171,56	131,18	113,59	117,16	42,7	137,81	88,7	54,82	3,14
	2,5	mm	350,78	192,67	200,88	135,61	82,61	239,54	59,65	81,63	4,23
	1,25	mm	229,74	209,08	323,2	166,52	197,89	268,53	232,73	106	5,02
	630	µm	212,67	199,64	305,67	168,97	193,72	261,31	226,07	137,37	9,78
	315	µm	175,6	180,29	280,95	154,1	176,03	228,09	183,28	122,71	11,67
	160	µm	112,42	100,14	161,61	79,54	96,56	122,98	93,04	66,96	8,69
	80	µm	127,53	119,04	167,7	165,97	106,04	151,11	113,95	70,04	11,72
	< 80	µm	211,29	380,01	302,45	99,02	99,39	247,37	218,06	123,8	25,86

Critères de Cuivre (Cu)				
	A	B	C	RESC
mg/kg	40	100	500	2500

	Echantillon		A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B 3	C1
Concentrations en Cu (mg/kg)	0/5	mm	35,93	38,05	62,51	32,85	36,97	44,7	23,83	29,01	5,68
	5	mm	95,58	31,86	54,55	41,17	15,09	58,65	21,91	23,36	8,29
	2,5	mm	63,34	44,04	121,13	65,03	38,22	84,49	14,43	52,08	10,79
	1,25	mm	57	32,39	119,7	45,99	62,71	75,3	43,56	57,03	10,48
	630	µm	55,68	35,35	90,15	56	43,48	63,02	33,16	45,74	11,44
	315	µm	42,13	34,16	89,58	38,15	46,82	61,91	27,63	36,74	12,72
	160	µm	32,24	35,79	105,26	13,34	87,63	40,51	20,44	18,2	8,66
	80	µm	29,94	28,18	51,1	55,22	35,02	43,38	21,62	20,31	19,83
	< 80	µm	58,23	31	120,42	17,89	28,23	66,94	43,54	46,23	47,61

Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B232285
Date du rapport: 2012/07/05

École des technologies supérieures

Adresse du site: ABRASIFS, GATINEAU
Votre # de commande: 64707

HAP PAR GCMS (SOL)

Identification Maxxam					R36653	R36654	R36655	R36656		
Date d'échantillonnage					2012/06/13	2012/06/13	2012/06/13	2012/06/13		
# Bordereau					e849859	e849859	e849859	e849859		
	Unités de	A	B	C	A-01	A-02	A-03	A-04	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	7.7	8.3	8.4	7.8	N/A	N/A
HAP										
Acénaphtène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Acénaphtylène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Anthracène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Benzo(a)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Benzo(a)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Benzo(b+j+k)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.1	1022070
Benzo(c)phénanthrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Chrysène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Dibenz(a,h)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Dibenzo(a,i)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Dibenzo(a,h)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Dibenzo(a,l)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
7,12-Diméthylbenzanthracène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Fluoranthène	mg/kg	0.1	10	100	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1022070
Fluorène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
3-Méthylcholanthrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Naphtalène	mg/kg	0.1	5	50	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Phénanthrène	mg/kg	0.1	5	50	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Pyrène	mg/kg	0.1	10	100	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	1022070
2-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
1-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
1,3-Diméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
2,3,5-Triméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Récupération des Surrogates (%)										
D10-Anthracène	%	-	-	-	97	94	93	92	N/A	1022070
D12-Benzo(a)pyrène	%	-	-	-	88	86	84	83	N/A	1022070
D14-Terphenyl	%	-	-	-	119	118	116	117	N/A	1022070
D8-Acenaphthylene	%	-	-	-	86	87	86	85	N/A	1022070
D8-Naphtalène	%	-	-	-	89	87	85	84	N/A	1022070

N/A = Non Applicable
LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A III-1 Résidus GTA de Gatineau

Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B232285
Date du rapport: 2012/07/05

École des technologies supérieures

Adresse du site: ABRASIFS, GATINEAU
Votre # de commande: 64707

HAP PAR GCMS (SOL)

Identification Maxxam					R36657	R36658	R36659	R36659		
Date d'échantillonnage					2012/06/13	2012/06/13	2012/06/13	2012/06/13		
# Bordereau					e849859	e849859	e849859	e849859		
	Unités de	**A**	**B**	**C**	**B-01**	**B-02**	**B-03**	**B-03 Dup. de Lab.**	**LDR**	**Lot CQ**
% Humidité	%	-	-	-	7.7	7.5	5.6	5.6	N/A	N/A
HAP										
Acénaphtène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Acénaphtylène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Anthracène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Benzo(a)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Benzo(a)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Benzo(b+j+k)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Benzo(c)phénanthrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg	0.1	1	10	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Chrysène	mg/kg	0.1	1	10	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Dibenz(a,h)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Dibenzo(a,i)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Dibenzo(a,h)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Dibenzo(a,l)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
7,12-Diméthylbenzanthracène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Fluoranthène	mg/kg	0.1	10	100	0.4	0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Fluorène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
3-Méthylcholanthrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Naphtalène	mg/kg	0.1	5	50	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Phénanthrène	mg/kg	0.1	5	50	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Pyrène	mg/kg	0.1	10	100	0.3	0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
2-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
1-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
1,3-Diméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
2,3,5-Triméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1022070
Récupération des Surrogates (%)										
D10-Anthracène	%	-	-	-	94	93	99	95	N/A	1022070
D12-Benzo(a)pyrène	%	-	-	-	87	84	89	85	N/A	1022070
D14-Terphenyl	%	-	-	-	119	118	126	120	N/A	1022070
D8-Acenaphthylene	%	-	-	-	89	86	91	87	N/A	1022070

N/A = Non Applicable
LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A III-2 Résidus GTB de Gatineau

Identification Maxxam					R36857	R36858	R36859	R36859		
Date d'échantillonnage					2012/06/13	2012/06/13	2012/06/13	2012/06/13		
# Bordereau					e849859	e849859	e849859	e849859		
	Unités de	**A**	**B**	**C**	**B-01**	**B-02**	**B-03**	**B-03 Dup. de Lab.**	**LDR**	**Lot CQ**
D8-Naphtalène	%	-	-	-	88	86	91	87	N/A	1022070

N/A = Non Applicable
LDR = Limite de détection rapportée

Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B232285
Date du rapport: 2012/07/05

École des technologies supérieures

Adresse du site: ABRASIFS, GATINEAU
Votre # de commande: 64707

HYDROCARBURES PAR GCFID (SOL)

Identification Maxxam					R36853	R36854	R36855	R36856		
Date d'échantillonnage					2012/06/13	2012/06/13	2012/06/13	2012/06/13		
# Bordereau					e849859	e849859	e849859	e849859		
	Unités de	**A**	**B**	**C**	**A-01**	**A-02**	**A-03**	**A-04**	**LDR**	**Lot CQ**
% Humidité	%	-	-	-	7.7	8.3	8.4	7.8	N/A	N/A
HYDRO. PÉTROLIERS TOTAUX										
Hydrocarbures Pétroliers (C10-C50)	mg/kg	**300**	700	**3500**	1300	1400	1200	1200	100	1022067
Récupération des Surrogates (%)										
1-Chlorooctadécane	%	-	-	-	92	89	83	87	N/A	1022067

N/A = Non Applicable
LDR = Limite de détection rapportée

Identification Maxxam					R36857	R36858	R36859	R36859		
Date d'échantillonnage					2012/06/13	2012/06/13	2012/06/13	2012/06/13		
# Bordereau					e849859	e849859	e849859	e849859		
	Unités de	**A**	**B**	**C**	**B-01**	**B-02**	**B-03**	**B-03 Dup. de Lab.**	**LDR**	**Lot CQ**
% Humidité	%	-	-	-	7.7	7.5	5.6	5.6	N/A	N/A
HYDRO. PÉTROLIERS TOTAUX										
Hydrocarbures Pétroliers (C10-C50)	mg/kg	**300**	700	**3500**	1500	1000	910	870	100	1022067
Récupération des Surrogates (%)										
1-Chlorooctadécane	%	-	-	-	85	84	89	86	N/A	1022067

N/A = Non Applicable
LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A III-3 Résidus GTA de Gatineau

Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B232285
Date du rapport: 2012/07/05

École des technologies supérieures

Adresse du site: ABRASIFS, GATINEAU
Votre # de commande: 64707

MÉTAUX (SOL)

Identification Maxxam					R36653	R36654	R36655	R36656	R36657		
Date d'échantillonnage					2012/06/13	2012/06/13	2012/06/13	2012/06/13	2012/06/13		
# Bordereau					e849859	e849859	e849859	e849859	e849859		
	Unités de	A	B	C	A-01	A-02	A-03	A-04	B-01	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	7.7	8.3	8.4	7.8	7.7	N/A	N/A
MÉTAUX											
Argent (Ag)	mg/kg	**2**	20	**40**	<0.8	<0.8	<0.8	<0.8	<0.8	0.8	1022142
Arsenic (As)	mg/kg	**6**	30	**50**	5	<5	6	<5	<5	5	1022142
Baryum (Ba)	mg/kg	**200**	500	**2000**	52	51	40	41	46	5	1022142
Cadmium (Cd)	mg/kg	**1.5**	5	**20**	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.5	1022142
Cobalt (Co)	mg/kg	**15**	50	**300**	3	3	4	4	7	2	1022142
Chrome (Cr)	mg/kg	**85**	250	**800**	39	23	28	22	24	2	1022142
Cuivre (Cu)	mg/kg	**40**	100	**500**	36	31	**68**	37	**41**	2	1022142
Etain (Sn)	mg/kg	**5**	50	**300**	<4	**10**	<4	<4	<4	4	1022142
Manganèse (Mn)	mg/kg	**770**	1000	**2200**	200	210	200	200	190	2	1022142
Molybdène (Mo)	mg/kg	**2**	10	**40**	2	<1	<1	1	1	1	1022142
Nickel (Ni)	mg/kg	**50**	100	**500**	8	8	8	8	9	1	1022142
Plomb (Pb)	mg/kg	**50**	500	**1000**	35	7	6	8	8	5	1022142
Zinc (Zn)	mg/kg	**110**	500	**1500**	**150**	**150**	**210**	**120**	**180**	10	1022142

N/A = Non Applicable
LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A III-4 Résidus GTA de Gatineau

Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B232285
Date du rapport: 2012/07/05

École des technologies supérieures

Adresse du site: ABRASIFS, GATINEAU
Votre # de commande: 64707

MÉTAUX (SOL)

Identification Maxxam					R36858	R36859		
Date d'échantillonnage					2012/06/13	2012/06/13		
# Bordereau					e849859	e849859		
	Unités de	A	B	C	B-02	B-03	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	7.5	5.6	N/A	N/A
MÉTAUX								
Argent (Ag)	mg/kg	**2**	20	**40**	<0.8	<0.8	0.8	1022142
Arsenic (As)	mg/kg	**6**	30	**50**	<5	<5	5	1022142
Baryum (Ba)	mg/kg	**200**	500	**2000**	39	36	5	1022142
Cadmium (Cd)	mg/kg	**1.5**	5	**20**	<0.5	<0.5	0.5	1022142
Cobalt (Co)	mg/kg	**15**	50	**300**	5	5	2	1022142
Chrome (Cr)	mg/kg	**85**	250	**800**	25	32	2	1022142
Cuivre (Cu)	mg/kg	**40**	100	**500**	22	26	2	1022142
Etain (Sn)	mg/kg	**5**	50	**300**	<4	<4	4	1022142
Manganèse (Mn)	mg/kg	**770**	1000	**2200**	200	170	2	1022142
Molybdène (Mo)	mg/kg	**2**	10	**40**	<1	1	1	1022142
Nickel (Ni)	mg/kg	**50**	100	**500**	8	8	1	1022142
Plomb (Pb)	mg/kg	**50**	500	**1000**	6	7	5	1022142
Zinc (Zn)	mg/kg	**110**	500	**1500**	**140**	85	10	1022142

N/A = Non Applicable
LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A III-4 Résidus GTB de Gatineau

Date échantillonnage 2012-06-13																
Date d'analyse 2012-09-20																
Norme	MA-200-Mét .1.2					Échantillon	A 1									
Paramètres analysés	unités	Critères génériques														
Métaux et Metalloïdes		A	B	C	D	Fraction										
						0/5 mm	5 mm	2,5 mm	1,25 mm	630 µm	315 µm	160 µm	80 µm	< 80 µm	LDR	
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200											
Arsenic (As)	mg/kg	6	30	50	250	6,62	3,91	5,04					2,83	2	5	
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2 000	10 000											
Cadmium (Cd)	mg/kg	1,5	5	20	100	0,47	0,43	0,71	0,58	0,44	0,36	0,3	0,33	0,39	0,5	
Cobalt (Co)	mg/kg	15	50	300	1 500	5,1	5,66	5,58	5,24	4,69	4,33	2,7	3,9	5,72	2	
Chrome (Cr)	mg/kg	85	250	800	4 000	29,03	31,67	25,8	27,73	26,62	28,7	23,79	22,83	26,22	2	
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2 500	35,93	95,58	63,34	57	55,68	42,13	32,24	29,94	58,23	2	
Étain (Sn)	mg/kg	5	50	300	1 500											
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1 000	2 200	11 000	201,05	414,8	330,7	289,6	231,45	204	150,62	179,19	245,76	2	
Mercure (Hg)	mg/kg	0,2	2	10	50											
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200											
Nickel (Ni)	mg/kg	50	100	500	2 500	11,06	11,66	13,02	10,64	9,89	8,57	7	9,45	11,63	1	
Plomb (Pb)	mg/kg	50	500	1 000	5 000	40,8	14,82	21,86	16,18	16,58	11,91	6,17	17,23	18,32	5	
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	50											
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1 500	7 500	159,16	171,5	350,7	229,7	212,67	175,6	112,42	127,5	211,29	10	
LDR : Limite de détection rapportée																

Figure-A III-5 Fractionnement des résidus GTA de Gatineau

Date échantillonnage 2012-06-13															
Date d'analyse 2012-09-20															
Norme	MA-200-Mét .1.2					Échantillon	A 2								
Paramètres analysés		Critères génériques													
Métaux et Metalloïdes	unités	A	B	C	D	Fraction									
						0/5	5	2,5	1,25	630	315	160	80	< 80	LDR
						mm	mm	mm	mm	µm	µm	µm	µm	µm	
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200										
Arsenic (As)	mg/kg	6	30	50	250		1,2	3,77	3,96		4	4,74		2,87	5
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2 000	10 000										
Cadmium (Cd)	mg/kg	1,5	5	20	100	0,35	0,35	0,44	0,39	0,37	0,33	0,29	0,3	0,44	0,5
Cobalt (Co)	mg/kg	15	50	300	1 500	5	4,44	5,27	5,01	5,1	1,66	2,49	3,53	5,53	2
Chrome (Cr)	mg/kg	85	250	800	4 000	26,78	18,39	25,34	24,78	25,14	25,67	21,04	22,55	25,88	2
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2 500	38,05	31,86	44,04	32,39	35,35	34,16	35,79	28,18	31	2
Étain (Sn)	mg/kg	5	50	300	1 500										
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1 000	2 200	11 000	196,21	286,17	268,35	223,52	224,71	208,19	143,41	166,21	239,21	2
Mercure (Hg)	mg/kg	0,2	2	10	50										
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200										
Nickel (Ni)	mg/kg	50	100	500	2 500	10,29	11,84	12,77	10,4	9,24	10,51	6,73	7,74	12,32	1
Plomb (Pb)	mg/kg	50	500	1 000	5 000	9,93	6,82	17,99	11,85	11,28	13,37	1,6	7,43	7,34	5
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	50										
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1 500	7 500	155,55	131,18	192,67	209,08	199,64	180,29	100,14	119,04	380,01	10
LDR : Limite de détection rapportée															

Figure-A III-6 Fractionnement des résidus GTA de Gatineau

Date échantillonnage 2012-06-13																
Date d'analyse 2012-09-20																
Norme	MA-200-Mét .1.2					Échantillon	A 3									
Paramètres analysés	unités	Critères génériques					Fraction									
Métaux et Metalloïdes		A	B	C	D		0/5 mm	5 mm	2,5 mm	1,25 mm	630 µm	315 µm	160 µm	80 µm	< 80 µm	LDR
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200											
Arsenic (As)	mg/kg	6	30	50	250			1,95	3,3					0,88		5
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2 000	10 000											
Cadmium (Cd)	mg/kg	1,5	5	20	100		0,44	0,37	0,45	0,46	0,42	0,42	0,31	0,3	0,4	0,5
Cobalt (Co)	mg/kg	15	50	300	1 500		5,3	4,02	5,75	6,39	5,8	6,3	3,99	4,69	5,88	2
Chrome (Cr)	mg/kg	85	250	800	4 000		26,89	13	28,67	29,25	27,13	27,42	26,59	21,95	24,88	2
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2 500		62,51	54,55	121,13	119,7	90,15	89,58	105,26	51,1	120,42	2
Étain (Sn)	mg/kg	5	50	300	1 500											
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1 000	2 200	11 000		200,91	298,8	292,7	258,9	233,7	225,4	164,9	170,1	258,6	2
Mercure (Hg)	mg/kg	0,2	2	10	50											
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200											
Nickel (Ni)	mg/kg	50	100	500	2 500		7,93	9,05	13,57	15,69	11,2	10,72	5,83	8,95	12,46	1
Plomb (Pb)	mg/kg	50	500	1 000	5 000		8,82	1,56	39,84	19,31	11,35	15,04	9,36	15,83	11,54	5
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	50											
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1 500	7 500		228,61	113,59	200,88	323,2	305,7	280,9	161,6	167,7	302,5	10
LDR : Limite de détection rapportée																

Figure-A III-7 Fractionnement des résidus GTA de Gatineau

Date échantillonnage 2012-06-13																
Date d'analyse 2012-09-20																
Norme	MA-200-Mét .1.2					Échantillon	A 4									
Paramètres analysés	unités	Critères génériques														
Métaux et Metalloïdes		A	B	C	D	Fraction										
						0/5	5	2,5	1,25	630	315	160	80	< 80	LDR	
						mm	mm	mm	mm	µm	µm	µm	µm	µm		
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200											
Arsenic (As)	mg/kg	6	30	50	250		3,62	3,41				3,56		1,88	5	
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2 000	10 000											
Cadmium (Cd)	mg/kg	1,5	5	20	100	0,37	0,4	0,6	0,44	0,4	0,4	0,31	0,42	0,27	0,5	
Cobalt (Co)	mg/kg	15	50	300	1 500	5,57	5,21	5,61	6,02	6,06	5,4	3,62	6,9	4,22	2	
Chrome (Cr)	mg/kg	85	250	800	4 000	23	27,36	52,65	24,58	27,23	25,99	20,6	26,23	22,56	2	
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2 500	32,85	41,17	65,03	45,99	56	38,15	13,34	55,22	17,89	2	
Étain (Sn)	mg/kg	5	50	300	1500											
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1 000	2 200	11 000	216	423,8	299,7	261,6	243,7	219,2	152,4	257,3	184,9	2	
Mercure (Hg)	mg/kg	0,2	2	10	50											
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200											
Nickel (Ni)	mg/kg	50	100	500	2 500	9,11	19,49	13,85	10,71	12,84	11,59	9,41	9,41	12,59	9,55	
Plomb (Pb)	mg/kg	50	500	1 000	5 000	8,03	9,77	13,06	13,46	13,29	19,34	10,15	16,84	11,54	5	
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	50											
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1 500	7 500	127,51	117,16	135,61	166,52	168,97	154,1	79,54	165,97	99,02	10	
LDR : Limite de détection rapportée																

Figure-A III-8 Fractionnement des résidus GTA de Gatineau

Date échantillonnage 2012-06-13															
Date d'analyse 2012-09-20															
Norme	MA-200-Mét .1.2					Échantillon	A 5								
Paramètres analysés	unités	Critères génériques													
Métaux et Metalloïdes		A	B	C	D	Fraction									
						0/5	5	2,5	1,25	630	315	160	80	< 80	LDR
						mm	mm	mm	mm	µm	µm	µm	µm	µm	
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200										
Arsenic (As)	mg/kg	6	30	50	250	4,07						4,17			5
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2 000	10 000										
Cadmium (Cd)	mg/kg	1,5	5	20	100	0,4	0,28	0,39	0,48	0,37	0,35	0,28	0,31	0,21	0,5
Cobalt (Co)	mg/kg	15	50	300	1 500	5,41	3,91	6,22	6,44	5,07	4,94	3,5	5,4	3,54	2
Chrome (Cr)	mg/kg	85	250	800	4 000	21,14	14,99	14,23	26,64	23,86	26,57	23,21	23,29	15,27	2
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2 500	36,97	15,09	38,22	62,71	43,48	46,82	87,63	35,02	28,23	2
Étain (Sn)	mg/kg	5	50	300	1 500										
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1 000	2 200	11 000	216 ,4	398,98	407,1	290,68	245,58	235,57	163,88	184,74	157,03	2
Mercure (Hg)	mg/kg	0,2	2	10	50										
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200										
Nickel (Ni)	mg/kg	50	100	500	2 500	10,49	4,28	11,74	11,28	8,03	11,02	10,55	6,64	6,72	1
Plomb (Pb)	mg/kg	50	500	1 000	5 000	9,38	5,95	33,23	12,17	16,93	13,41	13,32	8,7	3,54	5
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	50										
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1 500	7 500	150,22	42,7	82,61	197,89	193,72	176,03	96,56	106,04	99,39	10
LDR : Limite de détection rapportée															

Figure-A III-9 Fractionnement des résidus GTA de Gatineau

Date échantillonnage 2012-06-13																
Date d'analyse 2012-09-20																
Norme	MA-200-Mét .1.2					Échantillon	B 1									
Paramètres analysés	unités	Critères génériques														
Métaux et Metalloïdes		A	B	C	D	Fraction										
						0/5	5	2,5	1,25	630	315	160	80	< 80	LDR	
						mm	mm	mm	mm	µm	µm	µm	µm	µm		
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200											
Arsenic (As)	mg/kg	6	30	50	250										5	
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2 000	10 000											
Cadmium (Cd)	mg/kg	1,5	5	20	100	0,33	0,33	0,41	0,47	0,32	0,34	0,25	0,25	0,35	0,5	
Cobalt (Co)	mg/kg	15	50	300	1 500	4,73	5,45	6,21	6,47	6,3	5,98	4,36	4,6	5,99	2	
Chrome (Cr)	mg/kg	85	250	800	4 000	23,46	16,09	18,2	27,48	25,51	25,96	18,31	24,31	23,78	2	
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2 500	44,7	58,65	84,49	75,3	63,02	61,91	40,51	43,38	66,94	2	
Étain (Sn)	mg/kg	5	50	300	1 500											
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1 000	2 200	11 000	189,06	311,69	331,47	281,66	226,63	208,11	140,92	161,78	239,8	2	
Mercure (Hg)	mg/kg	0,2	2	10	50											
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200											
Nickel (Ni)	mg/kg	50	100	500	2 500	8,52	12,14	12,36	11,48	10,06	9,44	7,55	8,36	10,94	9,55	
Plomb (Pb)	mg/kg	50	500	1 000	5 000	6,68	7,26	16,9	20,63	17,26	5,32	0,01	10,79	37,34	5	
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	50											
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1 500	7 500	194,48	137,81	239,54	268,53	261,31	228,09	122,98	151,11	247,37	10	
LDR : Limite de détection rapportée																

Figure-A III-10 Fractionnement des résidus GTB de Gatineau

Date échantillonnage 2012-06-13																
Date d'analyse 2012-09-20																
Norme	MA-200-Mét .1.2					Échantillon	B 2									
Paramètres analysés	unités	Critères génériques														
Métaux et Metalloïdes		A	B	C	D	Fraction										
						0/5	5	2,5	1,25	630	315	160	80	< 80	LDR	
						mm	mm	mm	mm	µm	µm	µm	µm	µm		
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200											
Arsenic (As)	mg/kg	6	30	50	250		3,27	4,44		4,34	2,98	3,63	3,4		5	
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2 000	10 000											
Cadmium (Cd)	mg/kg	1,5	5	20	100	0,38	0,3	0,33	0,45	0,44	0,33	0,2	0,3	0,38	0,5	
Cobalt (Co)	mg/kg	15	50	300	1 500	6,62	4,88	4,71	6,77	8,58	6,43	4,38	5,27	8,98	2	
Chrome (Cr)	mg/kg	85	250	800	4 000	24,31	13,41	7,88	4,71	6,77	8,58	6,43	4,38	5,27	8,98	
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2 500	23,83	21,91	14,43	43,56	33,16	27,63	20,44	21,62	43,54	2	
Étain (Sn)	mg/kg	5	50	300	1 500											
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1 000	2 200	11 000	175,2	426,1	383,6	333,6	227,8	191,4	132,2	149,4	238,9	2	
Mercure (Hg)	mg/kg	0,2	2	10	50											
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200											
Nickel (Ni)	mg/kg	50	100	500	2 500	10,59	11,95	5,51	11,93	11,9	11,8	6,8	9,21	12,62	9,55	
Plomb (Pb)	mg/kg	50	500	1 000	5 000	6,57	5,5	10,77	9,48	11,35	8,5	19,61	7,24	9,8	5	
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	50											
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1 500	7 500	149,32	88,7	59,65	232,73	226,1	183,3	93,04	113,9	218,1	10	
LDR : Limite de détection rapportée																

Figure-A III-11 Fractionnement des résidus GTB de Gatineau

Date échantillonnage 2012-06-13																
Date d'analyse 2012-09-20																
Norme	MA-200-Mét .1.2					Échantillon	B 3									
Paramètres analysés	unités	Critères génériques														
Métaux et Metalloïdes		A	B	C	D	Fraction										
						0/5	5	2,5	1,25	630	315	160	80	< 80	LDR	
						mm	mm	mm	mm	µm	µm	µm	µm	µm		
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200											
Arsenic (As)	mg/kg	6	30	50	250	3,34		1,31				2,38			5	
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2 000	10 000											
Cadmium (Cd)	mg/kg	1,5	5	20	100	0,34	0,26	0,42	0,5	0,41	0,35	0,.8	0,25	0,36	0,5	
Cobalt (Co)	mg/kg	15	50	300	1 500	5,17	4,75	6,87	6,57	7,38	7,12	5,06	4,98	7,35	2	
Chrome (Cr)	mg/kg	85	250	800	4 000	26,83	12,59	16,72	20,69	27,46	28,78	21,64	21,17	25,54	2	
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2 500	29,01	23,36	52,08	57,03	45,74	36,74	18,2	20,31	46,23	2	
Étain (Sn)	mg/kg	5	50	300	1 500											
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1 000	2 200	11 000	207,9	436,1	330,4	330,6	247,3	227,3	163,3	165,9	246,9	2	
Mercure (Hg)	mg/kg	0,2	2	10	50											
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200											
Nickel (Ni)	mg/kg	50	100	500	2 500	9,62	9,91	13,71	11,6	11,72	11,06	8,47	6,19	9,6	9,55	
Plomb (Pb)	mg/kg	50	500	1 000	5 000	8,36	5,88	6,83	9,19	8,2	12,81	3,86	6,37	8,6	5	
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	50											
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1 500	7 500	99,89	54,82	81,63	106	137,4	122,7	66,96	70,04	123,8	10	
LDR : Limite de détection rapportée																

Figure-A III-12 Fractionnement des résidus GTB de Gatineau

Date échantillonnage 2012-06-13															
Date d'analyse 2012-09-20															
Norme	MA-200-Mét .1.2					Échantillon	C 1								
Paramètres analysés	unités	Critères génériques													
Métaux et Metalloïdes		A	B	C	D	Fraction									
						0/5	5	2,5	1,25	630	315	160	80	< 80	LDR
						mm	mm	mm	mm	µm	µm	µm	µm	µm	
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200										
Arsenic (As)	mg/kg	6	30	50	250	2,04	2,18	3,46						4,14	5
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2 000	10 000										
Cadmium (Cd)	mg/kg	1,5	5	20	100	0,2	0,1	0,14	0,16	0,15	0,11	0,13	0,12	0,28	0,5
Cobalt (Co)	mg/kg	15	50	300	1500	3,39	2,24	2,1	3,17	2,24	2,9	2,53	3,4	5,99	2
Chrome (Cr)	mg/kg	85	250	800	4 000	4,51	3,06	3,35	3,33	4,1	4,53	4,48	5,14	7,15	2
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2 500	5,68	8,29	10,79	10,48	11,44	12,72	8,66	19,83	47,61	2
Étain (Sn)	mg/kg	5	50	300	1 500										
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1 000	2 200	11 000	336,1	433,9	360,8	351,2	372,5	297,9	197,3	286,7	510,2	2
Mercure (Hg)	mg/kg	0,2	2	10	50										
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200										
Nickel (Ni)	mg/kg	50	100	500	2 500	5,86	5,86	7,08	6,33	4,83	7,47	4,69	7,37	12,15	9,55
Plomb (Pb)	mg/kg	50	500	1 000	5 000	3,95	2,81		1,8	8,4	8,9	1,53	6,71	14,24	5
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	50										
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1 500	7 500	9,31	3,14	4,23	5,02	9,78	11,67	8,69	11,72	25,86	10
LDR : Limite de détection rapportée															

Figure-A III-13 Fractionnement des résidus GTN de Gatineau

Date échantillonnage			2012-06-13									
Date d'analyse			2012-09-20									
Norme	MA-100-Lix.2.00											
Paramètres analysés	unités	Concentrations maximales dans le lixiviat de la matière solide	Échantillons									
Métaux et Metalloïdes			A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	C1	LDR
Argent (Ag)	mg/l											
Arsenic (As)	mg/l	5	0,12	N,D	N,D	N,D	0,47	0,2	0,4	0,18	N,D	0,02
Baryum (Ba)	mg/l	100										
Cadmium (Cd)	mg/l	0,5	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	0,01
Cobalt (Co)	mg/l		N,D	0,02	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	
Chrome (Cr)	mg/l	5	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	0,04
Cuivre (Cu)	mg/l	10	0,03	0,03	N,D	0,05	0,11	0,1	N,D	N,D	47,61	0,03
Étain (Sn)	mg/l											
Manganèse (Mn)	mg/l		N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	
Mercure (Hg)	mg/l	0,1										
Molybdène (Mo)	mg/l											
Nickel (Ni)	mg/l	10	0,05	0,05	N,D	0,06	0,04	N,D	0,08	0,07	0,07	0,02
Plomb (Pb)	mg/l	5	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	0,025
Sélénium (Se)	mg/l	1										
Zinc (Zn)	mg/l	10	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D	0,1
LDR : Limite de détection rapportée			ND : inférieure à la limite de détection rapportée									

Figure-A III-14 Lixiviation des résidus GTA, GTB, GTN de Gatineau

ANNEXE IV

RÉSULTATS DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION PHYSIQUE 1

Université du Québec
École de technologie supérieure
Département de génie de la construction

1100, rue Notre-Dame Ouest (angle Peel au sud) Montréal
(QC) H3C 1K3 Téléphone : 514 396-8800
http://www.gci.etsmtl.ca

Essais sur sols et granulats

Projet : Abrasifs Gatineau
Client : MTQ - D.T de l'Outaouais

Dossier n°:
Échantillon n° C 1
Normes : BNQ - 2560 – 040
Date de l'essai 26/06/2012

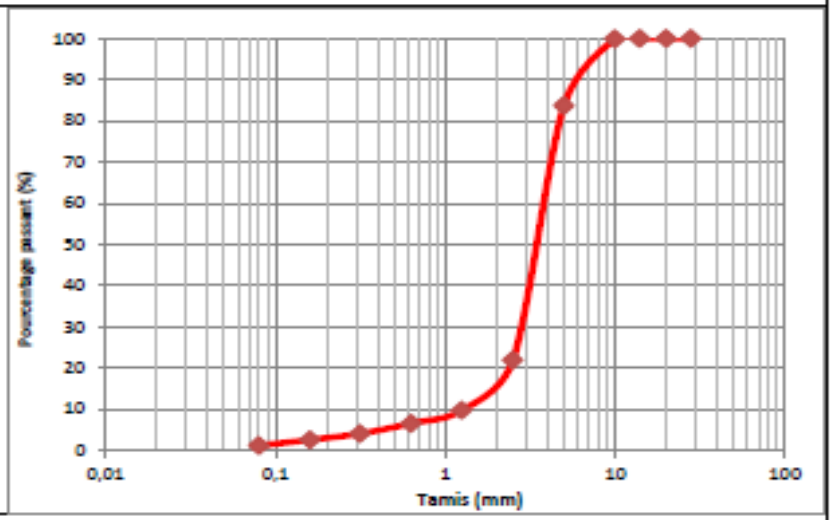
Description : Matériaux Abrasifs
Provenance : Gatineau
Utilisation: Résidus de Balayage printemps 2012

Prélevé le 13/06/2012
Endroit prélevé: Gatineau – Dépôt provisoire

Analyse Granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (% passant)	
	Mesuré	Exigences
28	100	
20	100	
14	100	
10	100	
5	83	
2.50	22	
1.250	10	
0.630	7	
0.315	4	
0.160	3	
0.080	1	

Courbe granulométrique



Essai Micro-Deval < 6 mm	Méthode d'essai	Résultats	Autres essais	Méthodes d'essai	Résultats
Pourcentage d'usure	LC 21-101	11.32	Colorimétrie	CSA A23-2-7A	1
Friabilité	LC 21-080	33.16	Coefficient d'écoulement	LC 21-075	97.3

Remarques :

Figure-A IV-1 Résidus GTN de Gatineau

Université du Québec
École de technologie supérieure
Département de génie de la construction

1100, rue Notre-Dame Ouest (angle Peel au sud) Montréal
(Qc) H3C 1K3 Téléphone : 514 396-8800
http://www.etsmtl.ca

Essais sur sols et granulats

Projet : Abrasifs Gatineau
Client : MTQ - D.T de l'Outaouais

Dossier n°:
Échantillon n° **A 1**
Normes : BNQ - 2560 – 040
Date de l'essai 26/06/2012

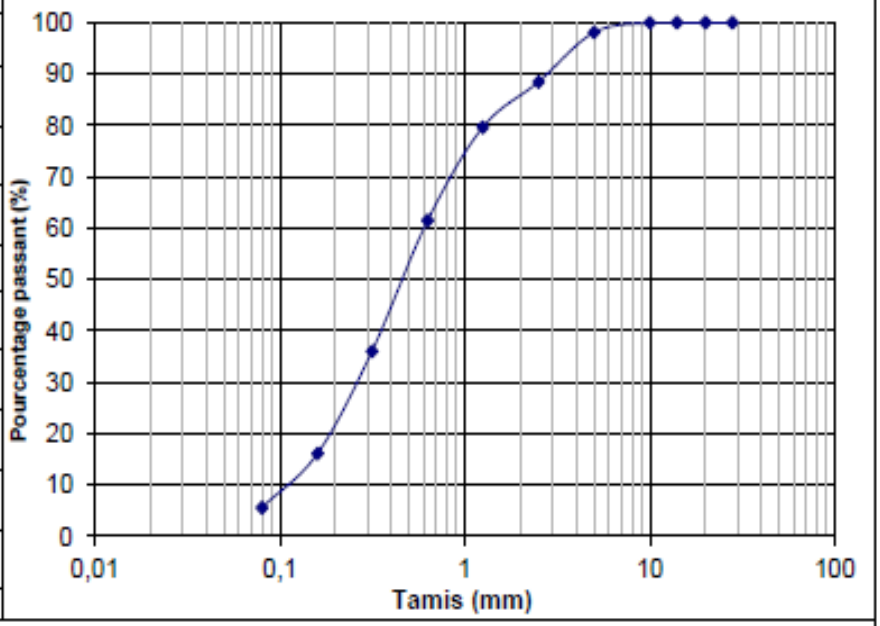
Description : Matériaux Abrasifs
Provenance : Gatineau
Utilisation: Résidus de Balayage printemps 2012

Prélevé le 13/06/2012
Endroit prélevé: Gatineau – Dépôt provisoire

Analyse Granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (% passant) Mesuré	Exigences
28	100	
20	100	
14	100	
10	100	
5	98	
2.50	90	
1.250	81	
0.630	63	
0.315	37	
0.160	16	
0.080	6	

Courbe granulométrique



Essai Micro-Deval < 5 mm	Méthode d'essai	Résultats	Autres essais	Méthodes d'essai	Résultats
Pourcentage d'usure	LC 21-101	23.76	Colorimétrie	CSA A23-2-7A	3
Friabilité	LC 21-080	24.50	Coefficient d'écoulement	LC 21-075	69.75

Remarques :

Figure-A IV-2 Résidus GTA de Gatineau

Université du Québec
École de technologie supérieure
Département de génie de la construction

1100, rue Notre-Dame Ouest (angle Peel au sud) Montréal
(Qc) H3C 1K3 Téléphone : 514 396-8800
http://www.etsmtl.ca

Essais sur sols et granulats

Projet : Abrasifs Gatineau
Client : MTQ - D.T de l'Outaouais

Dossier n° :
Échantillon n° **A 2**
Normes : BNQ - 2560 – 040
Date de l'essai 26/06/2012

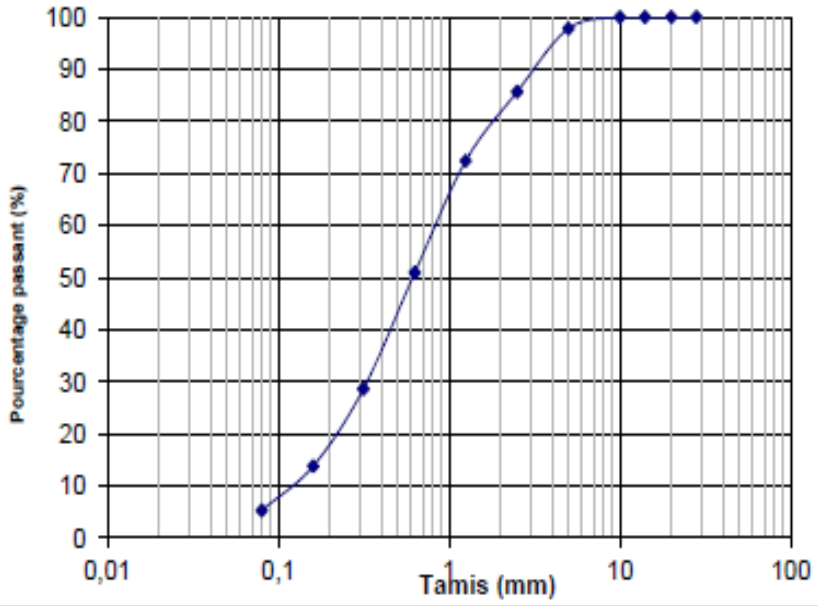
Description : Matériaux Abrasifs
Provenance : Gatineau
Utilisation: Résidus de Balayage printemps 2012

Prélevé le 13/06/2012
Endroit prélevé: Gatineau – Dépôt provisoire

Analyse Granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (% passant)	
	Mesuré	Exigences
28	100	
20	100	
14	100	
10	100	
5	98	
2.50	88	
1.250	74	
0.630	52	
0.315	29	
0.160	14	
0.080	5	

Courbe granulométrique



Essai Micro-Deval < 5 mm	Méthode d'essai	Résultats	Autres essais	Méthodes d'essai	Résultats
Pourcentage d'usure	LC 21-101	21.61	Colorimétrie	CSA A23-2-7A	2
Friabilité	LC 21-080	26.08	Coefficient d'écoulement	LC 21-075	68.90

Remarques :

Figure-A IV-3 Résidus GTA de Gatineau

Université du Québec
École de technologie supérieure
Département de génie de la construction

1100, rue Notre-Dame Ouest (angle Peel au sud) Montréal
(Qc) H3C 1K3 Téléphone : 514 396-8800
http://www.etsmtl.ca

Essais sur sols et granulats

Projet : Abrasifs Gatineau
Client : MTQ - D.T de l'Outaouais

Dossier n°:
Échantillon n° **A 3**
Normes : BNQ - 2560 – 040
Date de l'essai 26/06/2012

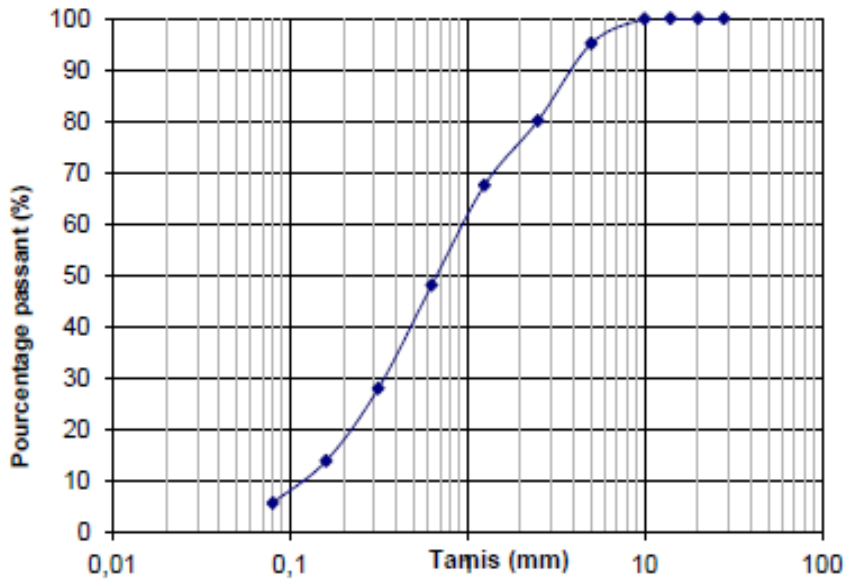
Description : Matériaux Abrasifs
Provenance : Gatineau
Utilisation: Résidus de Balayage printemps 2012

Prélevé le 13/06/2012
Endroit prélevé: Gatineau – Dépôt provisoire

Analyse Granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (% passant)	
	Mesuré	Exigences
28	**100**	
20	**100**	
14	**100**	
10	**100**	
5	**95**	
2.50	**82**	
1.250	**69**	
0.630	**49**	
0.315	**29**	
0.160	**14**	
0.080	**6**	

Courbe granulométrique



Essai Micro-Deval < 5 mm	Méthode d'essai	Résultats	Autres essais	Méthodes d'essai	Résultats
Pourcentage d'usure	LC 21-101	21.07	**Colorimétrie**	CSA A23-2-7A	2
Friabilité	LC 21-080	26.18	**Coefficient d'écoulement**	LC 21-075	65.84

Remarques :

Figure-A IV-4 Résidus GTA de Gatineau

Université du Québec
École de technologie supérieure
Département de génie de la construction

1100, rue Notre-Dame Ouest (angle Peel au sud) Montréal
(Qc) H3C 1K3 Téléphone : 514 396-8000
http://www.etsmtl.ca

Essais sur sols et granulats

Projet : Abrasifs Gatineau
Client : MTQ - D.T de l'Outaouais

Dossier n°:
Échantillon n° **A 4**
Normes : BNQ - 2560 – 040
Date de l'essai 26/06/2012

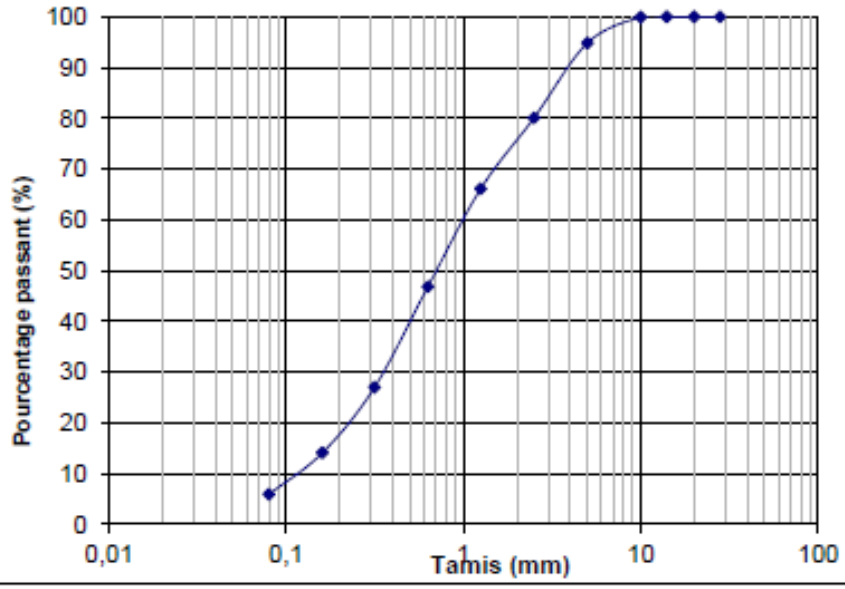
Description : Matériaux Abrasifs
Provenance : Gatineau
Utilisation: Résidus de Balayage printemps 2012

Prélevé le 13/06/2012
Endroit prélevé: Gatineau – Dépôt provisoire

Analyse Granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (% passant)	
	Mesuré	Exigences
28	100	
20	100	
14	100	
10	100	
5	95	
2.50	82	
1.250	68	
0.630	48	
0.315	28	
0.160	14	
0.080	6	

Courbe granulométrique



Essai Micro-Deval < 5 mm	Méthode d'essai	Résultats	Autres essais	Méthodes d'essai	Résultats
Pourcentage d'usure	LC 21-101	20.87	Colorimétrie	CSA A23-2-7A	3
Friabilité	LC 21-080	27.33	Coefficient d'écoulement	LC 21-075	65.16

Remarques :

Figure-A IV-5 Résidus GTA de Gatineau

Université du Québec
École de technologie supérieure
Département de génie de la construction

1100, rue Notre-Dame Ouest (angle Peel au sud) Montréal
(Qc) H3C 1K3 Téléphone : (514) 396-8800
http://www.etsmtl.ca

Essais sur sols et granulats

Projet : Abrasifs Gatineau
Client : MTQ - D.T de l'Outaouais

Dossier n°:
Échantillon n° A 5
Normes : BNQ - 2560 – 040
Date de l'essai 26/06/2012

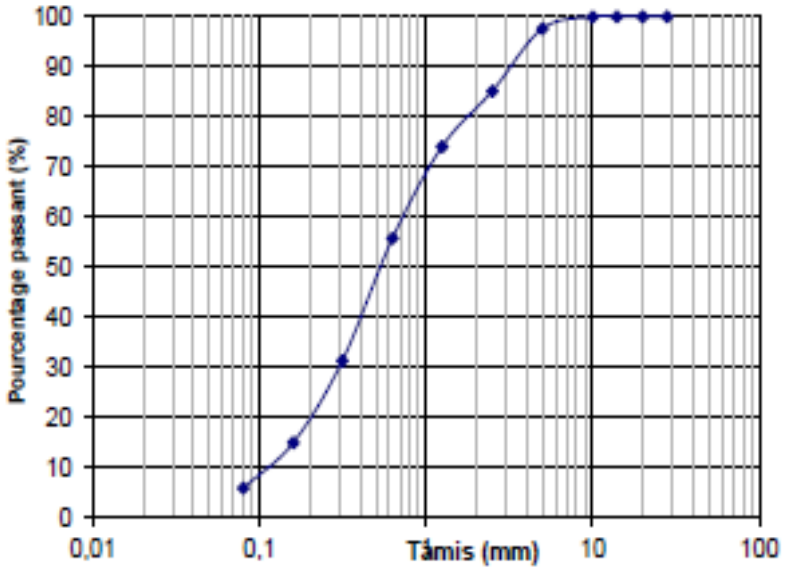
Description : Matériaux Abrasifs
Provenance : Gatineau
Utilisation: Résidus de Balayage printemps 2012

Prélevé le 13/06/2012
Endroit prélevé: Gatineau – Dépôt provisoire

Analyse Granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (% passant)	
	Mesuré	Exigences
28	100	
20	100	
14	100	
10	100	
5	98	
2.50	87	
1.250	76	
0.630	57	
0.315	32	
0.160	15	
0.080	6	

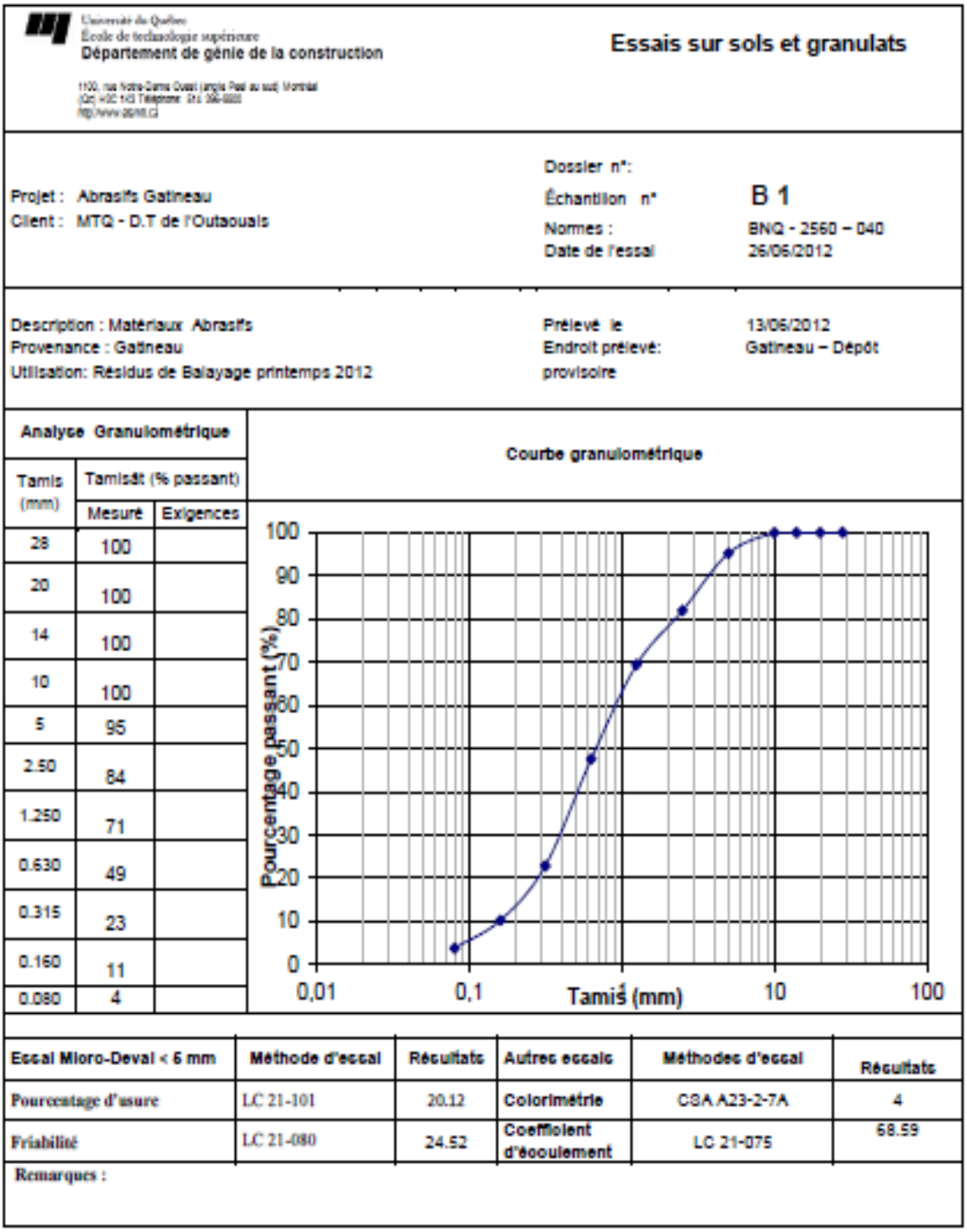
Courbe granulométrique



Essai Micro-Deval < 6 mm	Méthode d'essai	Résultats	Autres essais	Méthodes d'essai	Résultats
Pourcentage d'usure	LC 21-101	22.70	Colorimétrie	CSA A23-2-7A	3
Friabilité	LC 21-080	25.89	Coefficient d'écoulement	LC 21-075	63.52

Remarques :

Figure-A IV-6 Résidus GTA de Gatineau



Université du Québec
École de technologie supérieure
Département de génie de la construction

1100, rue Notre-Dame Ouest (angle Peel au sud) Montréal
(Qc) H3C 1K3 Téléphone : (514) 396-8800
http://www.etsmtl.ca

Essais sur sols et granulats

Projet : Abrasifs Gatineau
Client : MTQ - D.T de l'Outaouais

Dossier n°:
Échantillon n° B 1
Normes : BNQ - 2560 – 040
Date de l'essai 26/06/2012

Description : Matériaux Abrasifs
Provenance : Gatineau
Utilisation: Résidus de Balayage printemps 2012

Prélevé le 13/06/2012
Endroit prélevé: Gatineau – Dépôt provisoire

Analyse Granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (% passant)	
	Mesuré	Exigences
28	100	
20	100	
14	100	
10	100	
5	95	
2.50	84	
1.250	71	
0.630	49	
0.315	23	
0.160	11	
0.080	4	

Courbe granulométrique

Essai Micro-Deval < 5 mm	Méthode d'essai	Résultats	Autres essais	Méthodes d'essai	Résultats
Pourcentage d'usure	LC 21-101	20.12	Colorimétrie	CSA A23-2-7A	4
Friabilité	LC 21-080	24.52	Coefficient d'écoulement	LC 21-075	68.59

Remarques :

Figure-A IV-7 Résidus GTB de Gatineau

Université du Québec
École de technologie supérieure
Département de génie de la construction

1100, rue Notre-Dame Ouest (angle Peel au sud) Montréal
(Qc) H3C 1K3 Téléphone : (514) 396-8800
http://www.etsmtl.ca

Essais sur sols et granulats

Projet : Abrasifs Gatineau
Client : MTQ - D.T de l'Outaouais

Dossier n°:
Échantillon n° B 2
Normes : BNQ - 2560 – 040
Date de l'essai 26/06/2012

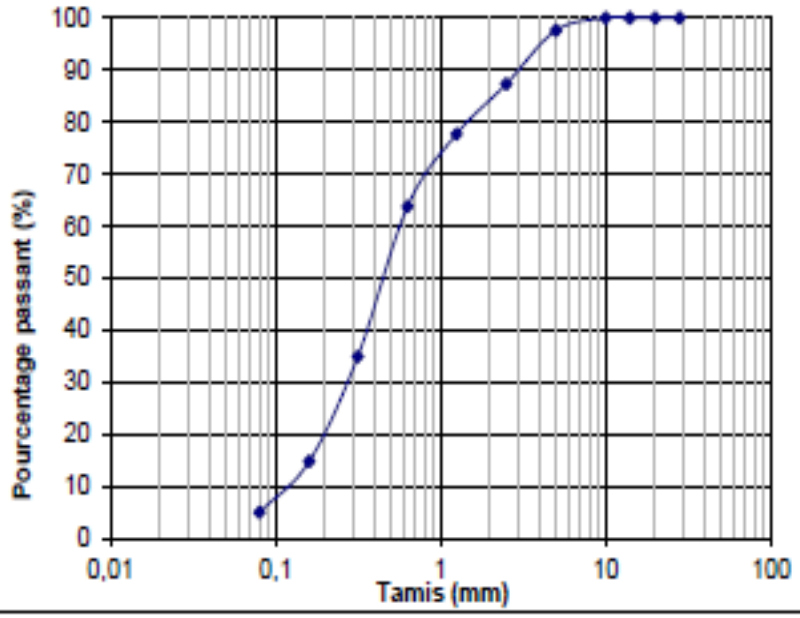
Description : Matériaux Abrasifs
Provenance : Gatineau
Utilisation: Résidus de Balayage printemps 2012

Prélevé le 13/06/2012
Endroit prélevé: Gatineau – Dépôt provisoire

Analyse Granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (% passant)	
	Mesuré	Exigences
28	100	
20	100	
14	100	
10	100	
5	98	
2.50	89	
1.250	79	
0.630	65	
0.315	36	
0.160	15	
0.080	5	

Courbe granulométrique



Essai Micro-Deval < 5 mm	Méthode d'essai	Résultats	Autres essais	Méthodes d'essai	Résultats
Pourcentage d'usure	LC 21-101	22.65	Colorimétrie	CSA A23-2-7A	3
Friabilité	LC 21-080	23.85	Coefficient d'écoulement	LC 21-075	66.37

Remarques :

Figure-A IV-8 Résidus GTB de Gatineau

Université du Québec
École de technologie supérieure
Département de génie de la construction

1100, rue Notre-Dame Ouest (angle Peel au sud) Montréal
(Qc) H3C 1K3 Téléphone : (514) 396-8800
http://www.etsmtl.ca

Essais sur sols et granulats

Projet : Abrasifs Gatineau
Client : MTQ - D.T de l'Outaouais

Dossier n°:
Échantillon n° B 3
Normes : BNQ - 2560 – 040
Date de l'essai 26/06/2012

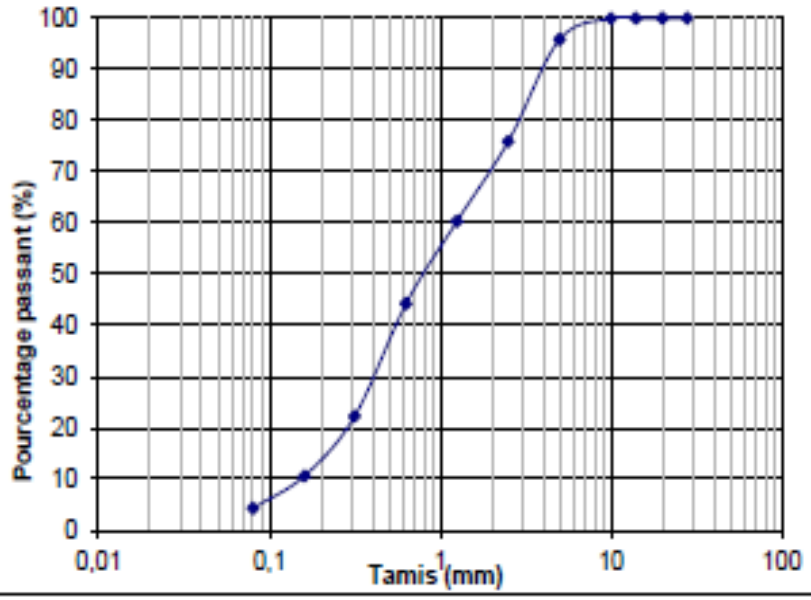
Description : Matériaux Abrasifs
Provenance : Gatineau
Utilisation: Résidus de Balayage printemps 2012

Prélevé le 13/06/2012
Endroit prélevé: Gatineau – Dépôt provisoire

Analyse Granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (% passant) Mesuré	Exigences
28	100	
20	100	
14	100	
10	100	
5	96	
2.50	78	
1.250	62	
0.630	45	
0.315	23	
0.160	11	
0.080	4	

Courbe granulométrique



Essai Micro-Deval < 6 mm	Méthode d'essai	Résultats	Autres essais	Méthodes d'essai	Résultats
Pourcentage d'usure	LC 21-101	20.01	Colorimétrie	CSA A23-2-7A	3
Friabilité	LC 21-080	27.16	Coefficient d'écoulement	LC 21-075	66.56

Remarques :

Figure-A IV-9 Résidus GTB de Gatineau

ANNEXE V

RÉSULTATS DES ESSAIS CHIMIQUES 2

Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B342038
Date du rapport: 2013/08/02

École des technologies supérieures

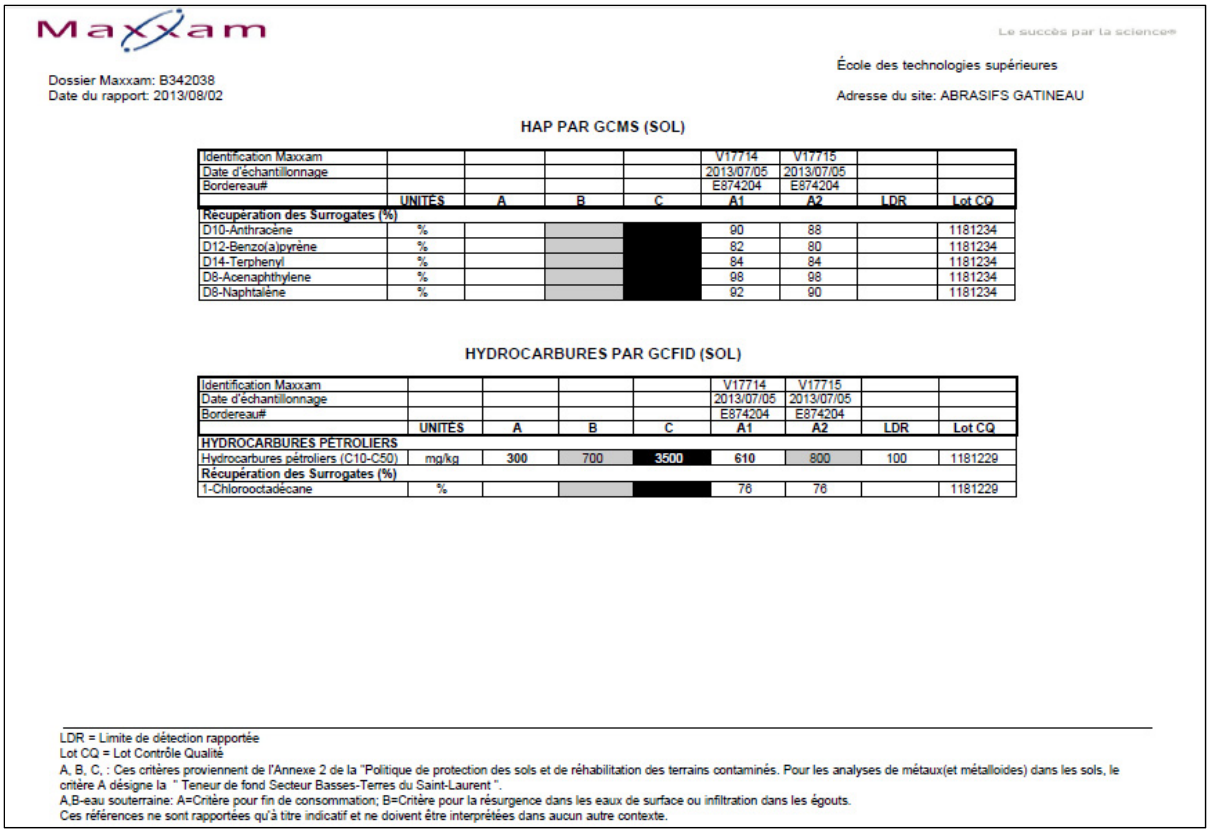
Adresse du site: ABRASIFS GATINEAU

HAP PAR GCMS (SOL)

Identification Maxxam					V17714	V17715		
Date d'échantillonnage					2013/07/05	2013/07/05		
Bordereau#					E874204	E874204		
	UNITÉS	A	B	C	A1	A2	LDR	Lot CQ
HAP								
Acénaphtène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Acénaphtylène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Anthracène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Benzo(a)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Benzo(a)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Benzo(j)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Benzo(k)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Benzo(c)phénanthrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Chrysène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Dibenz(a,h)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Dibenzo(a,i)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Dibenzo(a,h)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Dibenzo(a,l)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
7,12-Diméthylbenzanthracène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Fluoranthène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Fluorène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
3-Méthylcholanthrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Naphtalène	mg/kg	0.1	5	50	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Phénanthrène	mg/kg	0.1	5	50	<0.1	<0.1	0.1	1181234
Pyrène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	0.1	1181234
2-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
1-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
1,3-Diméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234
2,3,5-Triméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1181234

LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité
A, B, C, : Ces critères proviennent de l'Annexe 2 de la "Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés. Pour les analyses de métaux(et métalloïdes) dans les sols, le critère A désigne la " Teneur de fond Secteur Basses-Terres du Saint-Laurent ".
A,B-eau souterraine: A=Critère pour fin de consommation; B=Critère pour la résurgence dans les eaux de surface ou infiltration dans les égouts.
Ces références ne sont rapportées qu'à titre indicatif et ne doivent être interprétées dans aucun autre contexte.

Figure-A V-1 Échantillons GTD1 et GTD2 de Gatineau



Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B342038
Date du rapport: 2013/08/02

École des technologies supérieures

Adresse du site: ABRASIFS GATINEAU

HAP PAR GCMS (SOL)

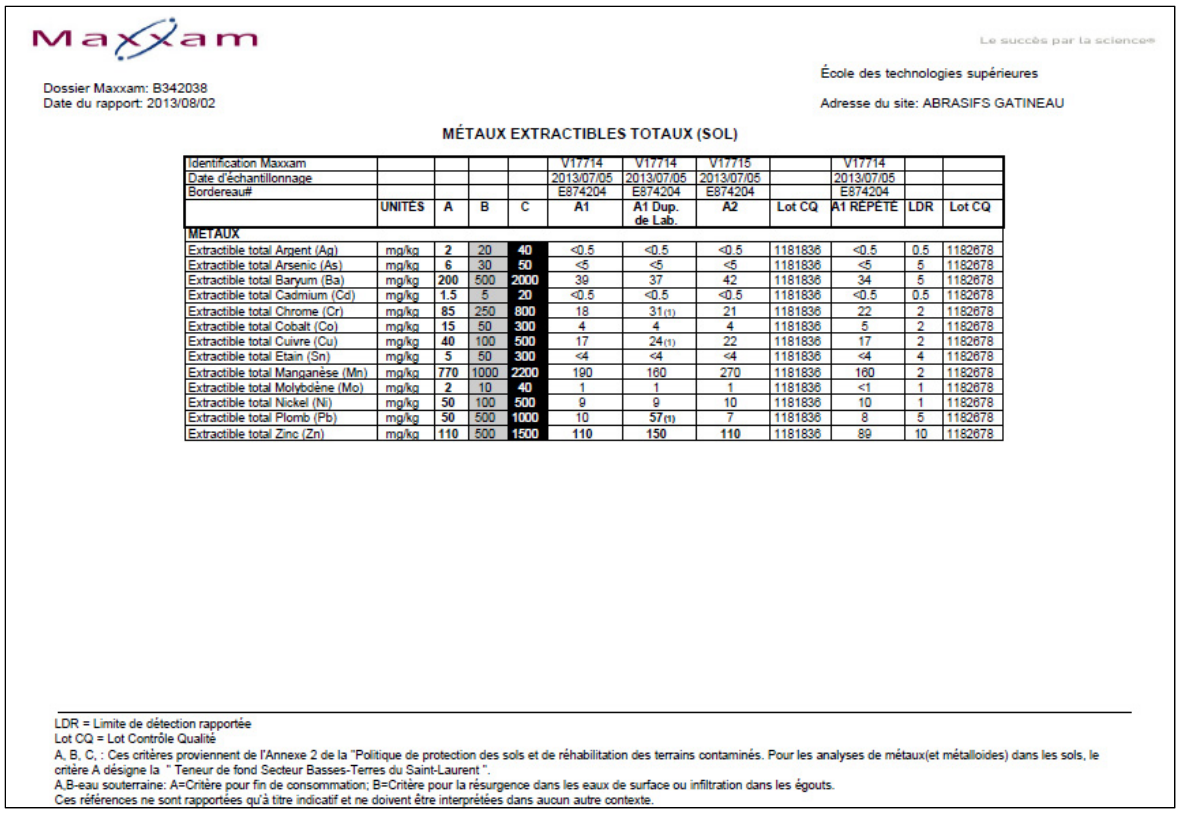
Identification Maxxam					V17714	V17715		
Date d'échantillonnage					2013/07/05	2013/07/05		
Bordereau#					E874204	E874204		
	UNITÉS	A	B	C	A1	A2	LDR	Lot CQ
Récupération des Surrogates (%)								
D10-Anthracène	%				90	88		1181234
D12-Benzo(a)pyrène	%				82	80		1181234
D14-Terphenyl	%				84	84		1181234
D8-Acenaphthylene	%				98	98		1181234
D8-Naphtalène	%				92	90		1181234

HYDROCARBURES PAR GCFID (SOL)

Identification Maxxam					V17714	V17715		
Date d'échantillonnage					2013/07/05	2013/07/05		
Bordereau#					E874204	E874204		
	UNITÉS	A	B	C	A1	A2	LDR	Lot CQ
HYDROCARBURES PÉTROLIERS								
Hydrocarbures pétroliers (C10-C50)	mg/kg	300	700	3500	610	800	100	1181229
Récupération des Surrogates (%)								
1-Chlorooctadécane	%				76	76		1181229

LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité
A, B, C, : Ces critères proviennent de l'Annexe 2 de la "Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés. Pour les analyses de métaux(et métalloïdes) dans les sols, le critère A désigne la " Teneur de fond Secteur Basses-Terres du Saint-Laurent ".
A,B-eau souterraine: A=Critère pour fin de consommation; B=Critère pour la résurgence dans les eaux de surface ou infiltration dans les égouts.
Ces références ne sont rapportées qu'à titre indicatif et ne doivent être interprétées dans aucun autre contexte.

Figure-A V-2 Échantillons GTD1 et GTD2 de Gatineau



Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B342038
Date du rapport: 2013/08/02

École des technologies supérieures

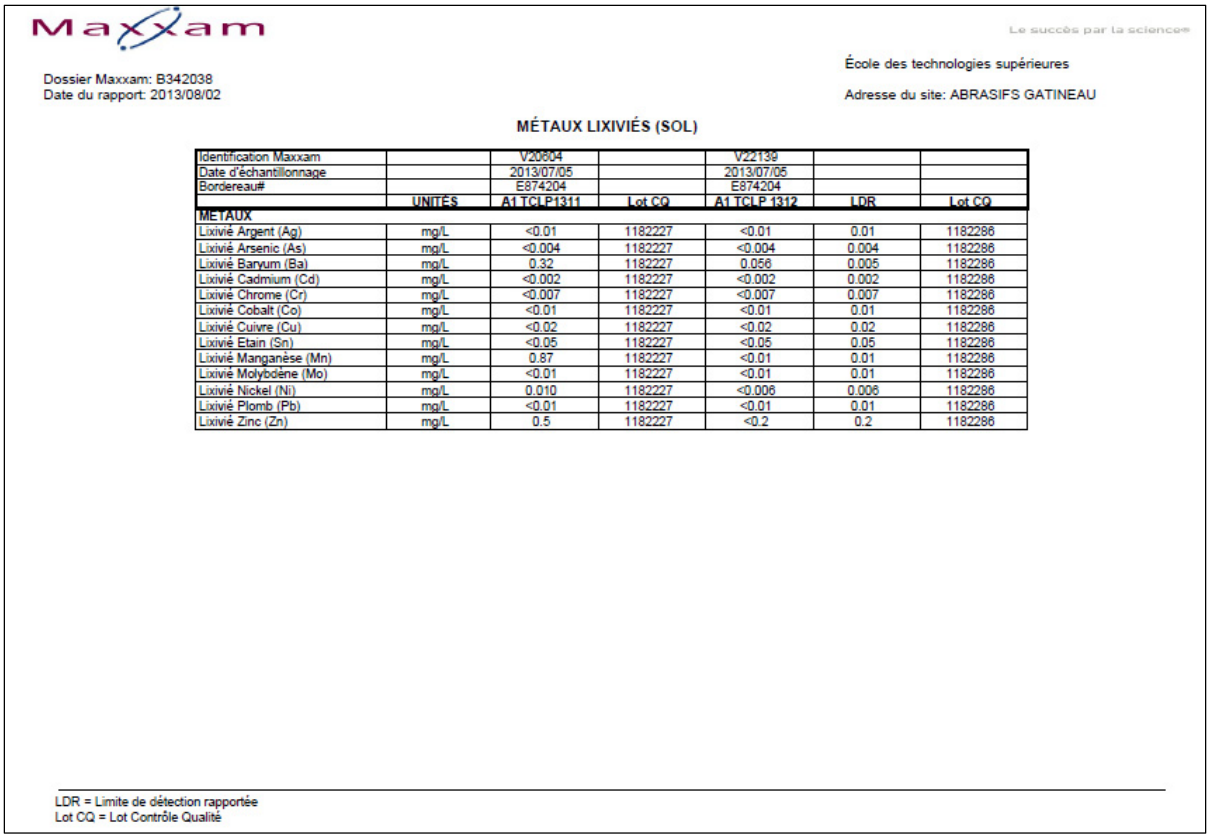
Adresse du site: ABRASIFS GATINEAU

MÉTAUX EXTRACTIBLES TOTAUX (SOL)

Identification Maxxam					V17714	V17714	V17715		V17714		
Date d'échantillonnage					2013/07/05	2013/07/05	2013/07/05		2013/07/05		
Bordereau#					E874204	E874204	E874204		E874204		
	UNITÉS	**A**	**B**	**C**	**A1**	**A1 Dup. de Lab.**	**A2**	**Lot CQ**	**A1 REPÉTÉ**	**LDR**	**Lot CQ**
MÉTAUX											
Extractible total Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	<0.5	<0.5	<0.5	1181836	<0.5	0.5	1182678
Extractible total Arsenic (As)	mg/kg	6	30	50	<5	<5	<5	1181836	<5	5	1182678
Extractible total Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2000	39	37	42	1181836	34	5	1182678
Extractible total Cadmium (Cd)	mg/kg	1.5	5	20	<0.5	<0.5	<0.5	1181836	<0.5	0.5	1182678
Extractible total Chrome (Cr)	mg/kg	85	250	800	18	31 (1)	21	1181836	22	2	1182678
Extractible total Cobalt (Co)	mg/kg	15	50	300	4	4	4	1181836	5	2	1182678
Extractible total Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	17	24 (1)	22	1181836	17	2	1182678
Extractible total Etain (Sn)	mg/kg	5	50	300	<4	<4	<4	1181836	<4	4	1182678
Extractible total Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1000	2200	190	160	270	1181836	160	2	1182678
Extractible total Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	1	1	1	1181836	<1	1	1182678
Extractible total Nickel (Ni)	mg/kg	50	100	500	9	9	10	1181836	10	1	1182678
Extractible total Plomb (Pb)	mg/kg	50	500	1000	10	57 (1)	7	1181836	8	5	1182678
Extractible total Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1500	110	150	110	1181836	89	10	1182678

LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité
A, B, C, : Ces critères proviennent de l'Annexe 2 de la "Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés. Pour les analyses de métaux(et métalloïdes) dans les sols, le critère A désigne la " Teneur de fond Secteur Basses-Terres du Saint-Laurent ".
A,B-eau souterraine: A=Critère pour fin de consommation; B=Critère pour la résurgence dans les eaux de surface ou infiltration dans les égouts.
Ces références ne sont rapportées qu'à titre indicatif et ne doivent être interprétées dans aucun autre contexte.

Figure-A V-3 Échantillons GTD1 et GTD2 de Gatineau



Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B342038
Date du rapport: 2013/08/02

École des technologies supérieures

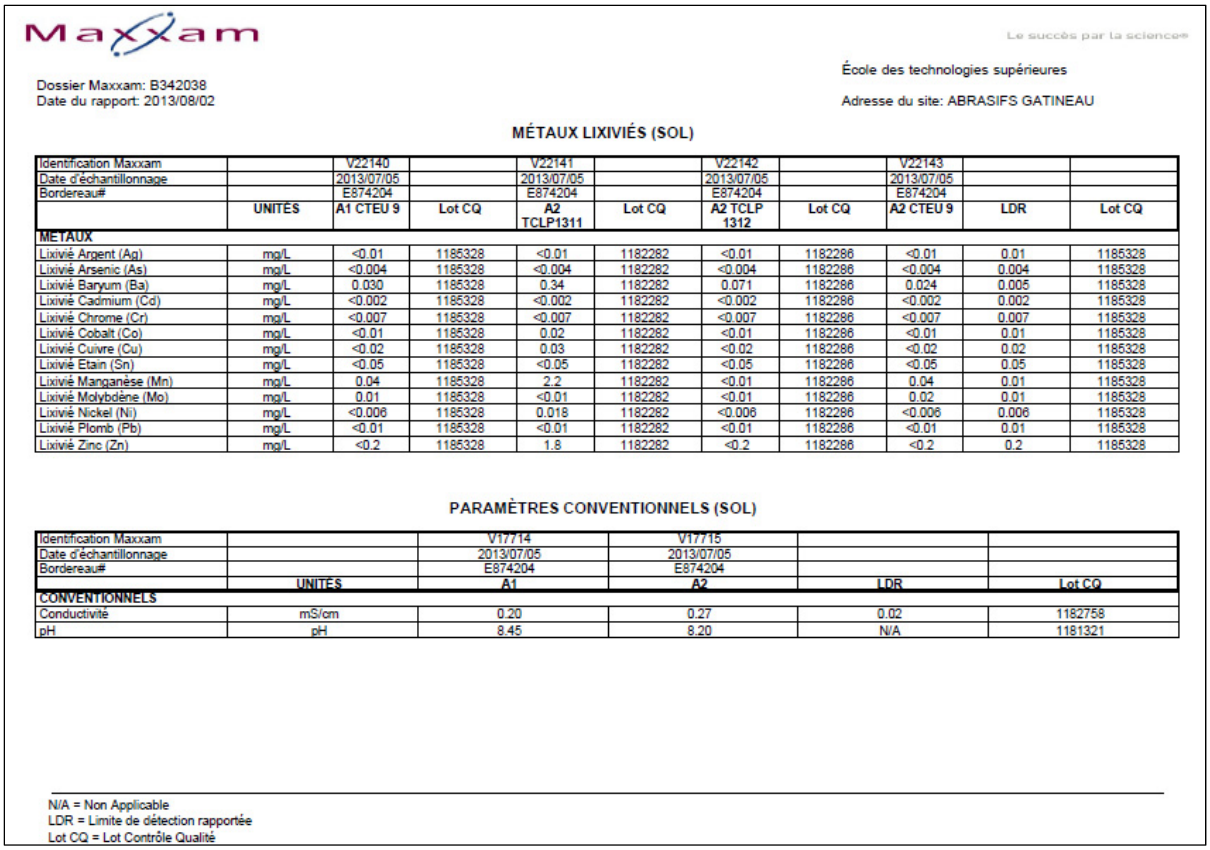
Adresse du site: ABRASIFS GATINEAU

MÉTAUX LIXIVIÉS (SOL)

Identification Maxxam		V20604		V22139		
Date d'échantillonnage		2013/07/05		2013/07/05		
Bordereau#		E874204		E874204		
	UNITÉS	**A1 TCLP1311**	**Lot CQ**	**A1 TCLP 1312**	**LDR**	**Lot CQ**
MÉTAUX						
Lixivié Argent (Ag)	mg/L	<0.01	1182227	<0.01	0.01	1182286
Lixivié Arsenic (As)	mg/L	<0.004	1182227	<0.004	0.004	1182286
Lixivié Baryum (Ba)	mg/L	0.32	1182227	0.056	0.005	1182286
Lixivié Cadmium (Cd)	mg/L	<0.002	1182227	<0.002	0.002	1182286
Lixivié Chrome (Cr)	mg/L	<0.007	1182227	<0.007	0.007	1182286
Lixivié Cobalt (Co)	mg/L	<0.01	1182227	<0.01	0.01	1182286
Lixivié Cuivre (Cu)	mg/L	<0.02	1182227	<0.02	0.02	1182286
Lixivié Etain (Sn)	mg/L	<0.05	1182227	<0.05	0.05	1182286
Lixivié Manganèse (Mn)	mg/L	0.87	1182227	<0.01	0.01	1182286
Lixivié Molybdène (Mo)	mg/L	<0.01	1182227	<0.01	0.01	1182286
Lixivié Nickel (Ni)	mg/L	0.010	1182227	<0.006	0.006	1182286
Lixivié Plomb (Pb)	mg/L	<0.01	1182227	<0.01	0.01	1182286
Lixivié Zinc (Zn)	mg/L	0.5	1182227	<0.2	0.2	1182286

LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité

Figure-A V-4 Échantillons GTD1 et GTD2 de Gatineau



Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B342038
Date du rapport: 2013/08/02

École des technologies supérieures

Adresse du site: ABRASIFS GATINEAU

MÉTAUX LIXIVIÉS (SOL)

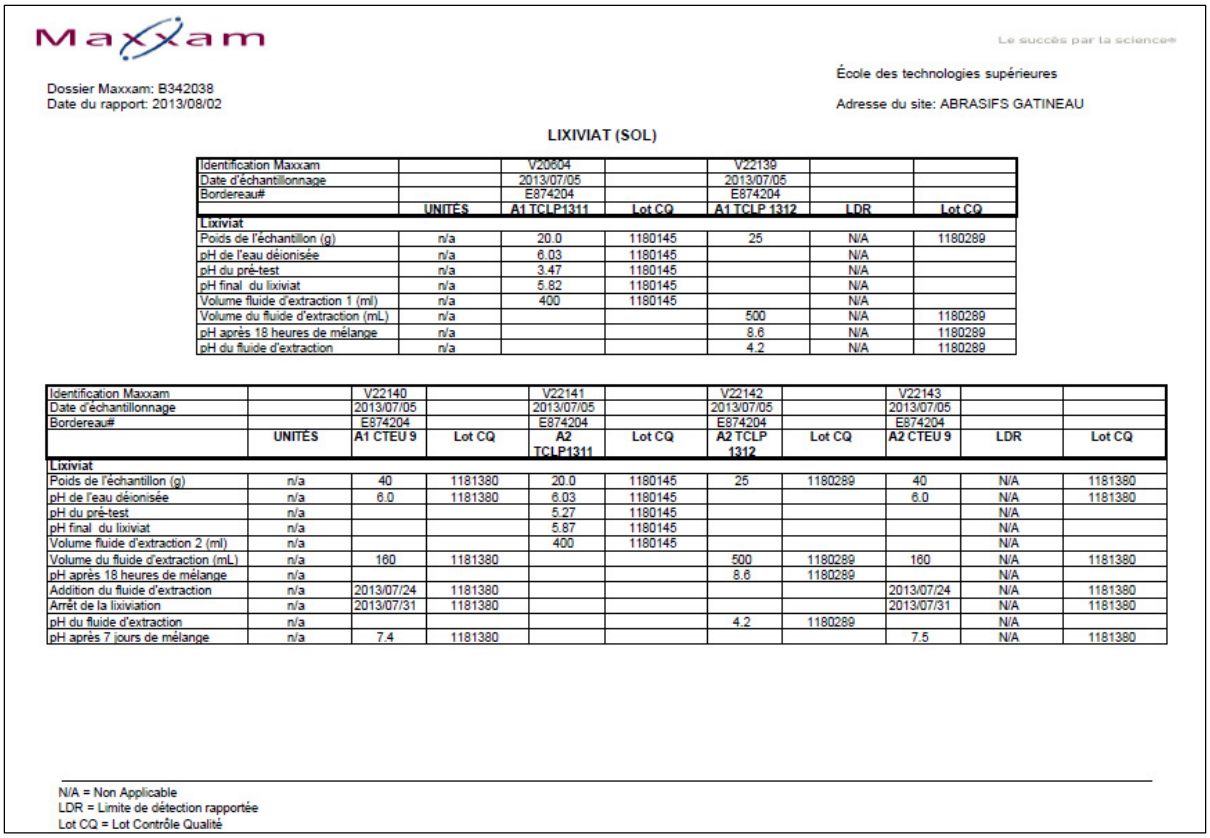
Identification Maxxam		V22140		V22141		V22142		V22143		
Date d'échantillonnage		2013/07/05		2013/07/05		2013/07/05		2013/07/05		
Bordereau#		E874204		E874204		E874204		E874204		
	UNITÉS	A1 CTEU 9	Lot CQ	A2 TCLP1311	Lot CQ	A2 TCLP 1312	Lot CQ	A2 CTEU 9	LDR	Lot CQ
MÉTAUX										
Lixivié Argent (Ag)	mg/L	<0.01	1185328	<0.01	1182282	<0.01	1182286	<0.01	0.01	1185328
Lixivié Arsenic (As)	mg/L	<0.004	1185328	<0.004	1182282	<0.004	1182286	<0.004	0.004	1185328
Lixivié Baryum (Ba)	mg/L	0.030	1185328	0.34	1182282	0.071	1182286	0.024	0.005	1185328
Lixivié Cadmium (Cd)	mg/L	<0.002	1185328	<0.002	1182282	<0.002	1182286	<0.002	0.002	1185328
Lixivié Chrome (Cr)	mg/L	<0.007	1185328	<0.007	1182282	<0.007	1182286	<0.007	0.007	1185328
Lixivié Cobalt (Co)	mg/L	<0.01	1185328	0.02	1182282	<0.01	1182286	<0.01	0.01	1185328
Lixivié Cuivre (Cu)	mg/L	<0.02	1185328	0.03	1182282	<0.02	1182286	<0.02	0.02	1185328
Lixivié Etain (Sn)	mg/L	<0.05	1185328	<0.05	1182282	<0.05	1182286	<0.05	0.05	1185328
Lixivié Manganèse (Mn)	mg/L	0.04	1185328	2.2	1182282	<0.01	1182286	0.04	0.01	1185328
Lixivié Molybdène (Mo)	mg/L	0.01	1185328	<0.01	1182282	<0.01	1182286	0.02	0.01	1185328
Lixivié Nickel (Ni)	mg/L	<0.006	1185328	0.018	1182282	<0.006	1182286	<0.006	0.006	1185328
Lixivié Plomb (Pb)	mg/L	<0.01	1185328	<0.01	1182282	<0.01	1182286	<0.01	0.01	1185328
Lixivié Zinc (Zn)	mg/L	<0.2	1185328	1.8	1182282	<0.2	1182286	<0.2	0.2	1185328

PARAMÈTRES CONVENTIONNELS (SOL)

Identification Maxxam		V17714	V17715		
Date d'échantillonnage		2013/07/05	2013/07/05		
Bordereau#		E874204	E874204		
	UNITÉS	A1	A2	LDR	Lot CQ
CONVENTIONNELS					
Conductivité	mS/cm	0.20	0.27	0.02	1182758
pH	pH	8.45	8.20	N/A	1181321

N/A = Non Applicable
LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité

Figure-A V-5 Échantillons GTD1 et GTD2 de Gatineau



Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B342038
Date du rapport: 2013/08/02

École des technologies supérieures

Adresse du site: ABRASIFS GATINEAU

LIXIVIAT (SOL)

Identification Maxxam		V20604		V22139		
Date d'échantillonnage		2013/07/05		2013/07/05		
Bordereau#		E874204		E874204		
	UNITÉS	A1 TCLP1311	Lot CQ	A1 TCLP 1312	LDR	Lot CQ
Lixiviat						
Poids de l'échantillon (g)	n/a	20.0	1180145	25	N/A	1180289
pH de l'eau déionisée	n/a	6.03	1180145		N/A	
pH du pré-test	n/a	3.47	1180145		N/A	
pH final du lixiviat	n/a	5.82	1180145		N/A	
Volume fluide d'extraction 1 (ml)	n/a	400	1180145		N/A	
Volume du fluide d'extraction (mL)	n/a			500	N/A	1180289
pH après 18 heures de mélange	n/a			8.6	N/A	1180289
pH du fluide d'extraction	n/a			4.2	N/A	1180289

Identification Maxxam		V22140		V22141		V22142		V22143		
Date d'échantillonnage		2013/07/05		2013/07/05		2013/07/05		2013/07/05		
Bordereau#		E874204		E874204		E874204		E874204		
	UNITÉS	A1 CTEU 9	Lot CQ	A2 TCLP1311	Lot CQ	A2 TCLP 1312	Lot CQ	A2 CTEU 9	LDR	Lot CQ
Lixiviat										
Poids de l'échantillon (g)	n/a	40	1181380	20.0	1180145	25	1180289	40	N/A	1181380
pH de l'eau déionisée	n/a	6.0	1181380	6.03	1180145			6.0	N/A	1181380
pH du pré-test	n/a			5.27	1180145				N/A	
pH final du lixiviat	n/a			5.87	1180145				N/A	
Volume fluide d'extraction 2 (ml)	n/a			400	1180145				N/A	
Volume du fluide d'extraction (mL)	n/a	160	1181380			500	1180289	160	N/A	1181380
pH après 18 heures de mélange	n/a					8.6	1180289		N/A	
Addition du fluide d'extraction	n/a	2013/07/24	1181380					2013/07/24	N/A	1181380
Arrêt de la lixiviation	n/a	2013/07/31	1181380					2013/07/31	N/A	1181380
pH du fluide d'extraction	n/a					4.2	1180289		N/A	
pH après 7 jours de mélange	n/a	7.4	1181380					7.5	N/A	1181380

N/A = Non Applicable
LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité

Figure-A V-6 Échantillons GTD1 et GTD2 de Gatineau

Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B342043
Date du rapport: 2013/07/24

École des technologies supérieures

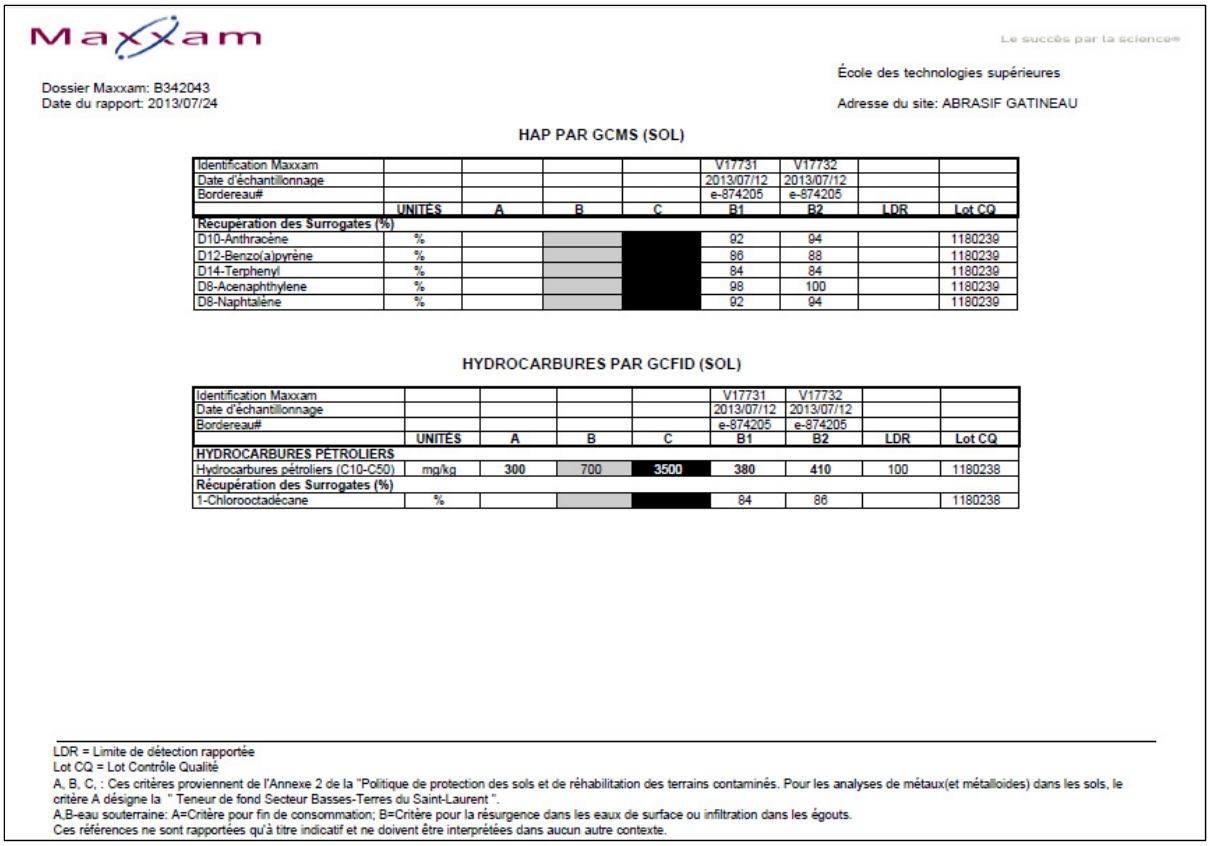
Adresse du site: ABRASIF GATINEAU

HAP PAR GCMS (SOL)

Identification Maxxam					V17731	V17732		
Date d'échantillonnage					2013/07/12	2013/07/12		
Bordereau#					e-874205	e-874205		
	UNITÉS	A	B	C	B1	B2	LDR	Lot CQ
HAP								
Acénaphtène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Acénaphtylène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Anthracène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Benzo(a)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Benzo(a)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Benzo(j)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Benzo(k)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Benzo(c)phénanthrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Chrysène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Dibenz(a,h)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Dibenzo(a,i)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Dibenzo(a,h)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Dibenzo(a,l)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
7,12-Diméthylbenzanthracène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Fluoranthène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Fluorène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
3-Méthylcholanthrène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Naphtalène	mg/kg	0.1	5	50	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Phénanthrène	mg/kg	0.1	5	50	<0.1	<0.1	0.1	1180239
Pyrène	mg/kg	0.1	10	100	<0.1	<0.1	0.1	1180239
2-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
1-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
1,3-Diméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239
2,3,5-Triméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	<0.1	<0.1	0.1	1180239

LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité
A, B, C, : Ces critères proviennent de l'Annexe 2 de la "Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés. Pour les analyses de métaux(et métalloides) dans les sols, le critère A désigne la " Teneur de fond Secteur Basses-Terres du Saint-Laurent ".
A,B-eau souterraine: A=Critère pour fin de consommation; B=Critère pour la résurgence dans les eaux de surface ou infiltration dans les égouts.
Ces références ne sont rapportées qu'à titre indicatif et ne doivent être interprétées dans aucun autre contexte.

Figure-A V-7 Échantillons GTL1 et GTL2 de Gatineau lavés à l'hydrocyclonnage



Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B342043
Date du rapport: 2013/07/24

École des technologies supérieures

Adresse du site: ABRASIF GATINEAU

HAP PAR GCMS (SOL)

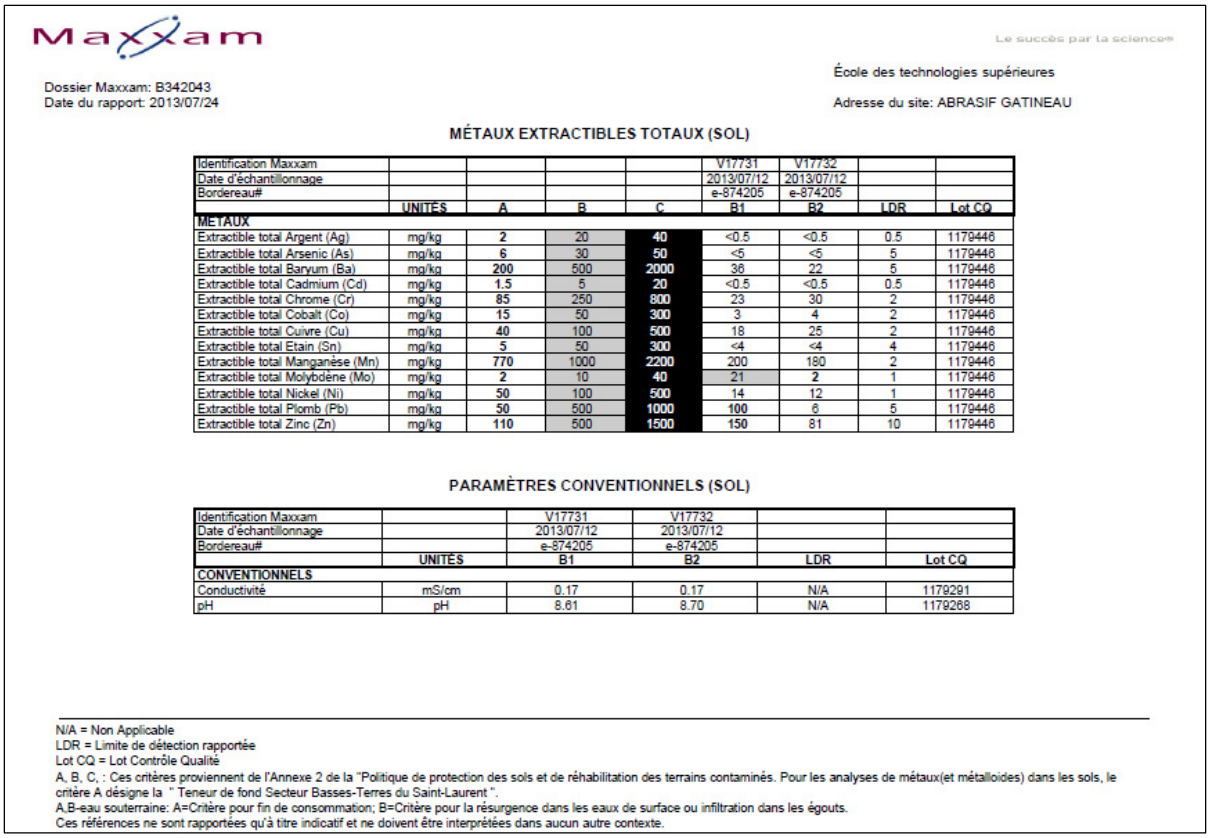
Identification Maxxam					V17731	V17732		
Date d'échantillonnage					2013/07/12	2013/07/12		
Bordereau#					e-874205	e-874205		
	UNITÉS	A	B	C	B1	B2	LDR	Lot CQ
Récupération des Surrogates (%)								
D10-Anthracène	%				92	94		1180239
D12-Benzo(a)pyrène	%				86	88		1180239
D14-Terphenyl	%				84	84		1180239
D8-Acenaphthylene	%				98	100		1180239
D8-Naphtalène	%				92	94		1180239

HYDROCARBURES PAR GCFID (SOL)

Identification Maxxam					V17731	V17732		
Date d'échantillonnage					2013/07/12	2013/07/12		
Bordereau#					e-874205	e-874205		
	UNITÉS	A	B	C	B1	B2	LDR	Lot CQ
HYDROCARBURES PÉTROLIERS								
Hydrocarbures pétroliers (C10-C50)	mg/kg	300	700	3500	380	410	100	1180238
Récupération des Surrogates (%)								
1-Chlorooctadécane	%				84	86		1180238

LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité
A, B, C, : Ces critères proviennent de l'Annexe 2 de la "Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés. Pour les analyses de métaux(et métalloides) dans les sols, le critère A désigne la " Teneur de fond Secteur Basses-Terres du Saint-Laurent ".
A,B-eau souterraine: A=Critère pour fin de consommation; B=Critère pour la résurgence dans les eaux de surface ou infiltration dans les égouts.
Ces références ne sont rapportées qu'à titre indicatif et ne doivent être interprétées dans aucun autre contexte.

Figure-A V-8 Échantillons GTL1 et GTL2 de Gatineau lavés à l'hydrocyclonnage



Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B342043
Date du rapport: 2013/07/24

École des technologies supérieures

Adresse du site: ABRASIF GATINEAU

MÉTAUX EXTRACTIBLES TOTAUX (SOL)

Identification Maxxam					V17731	V17732		
Date d'échantillonnage					2013/07/12	2013/07/12		
Bordereau#					e-874205	e-874205		
	UNITÉS	A	B	C	B1	B2	LDR	Lot CQ
MÉTAUX								
Extractible total Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	<0.5	<0.5	0.5	1179446
Extractible total Arsenic (As)	mg/kg	6	30	50	<5	<5	5	1179446
Extractible total Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2000	36	22	5	1179446
Extractible total Cadmium (Cd)	mg/kg	1.5	5	20	<0.5	<0.5	0.5	1179446
Extractible total Chrome (Cr)	mg/kg	85	250	800	23	30	2	1179446
Extractible total Cobalt (Co)	mg/kg	15	50	300	3	4	2	1179446
Extractible total Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	18	25	2	1179446
Extractible total Etain (Sn)	mg/kg	5	50	300	<4	<4	4	1179446
Extractible total Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1000	2200	200	180	2	1179446
Extractible total Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	21	2	1	1179446
Extractible total Nickel (Ni)	mg/kg	50	100	500	14	12	1	1179446
Extractible total Plomb (Pb)	mg/kg	50	500	1000	100	6	5	1179446
Extractible total Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1500	150	81	10	1179446

PARAMÈTRES CONVENTIONNELS (SOL)

Identification Maxxam		V17731	V17732		
Date d'échantillonnage		2013/07/12	2013/07/12		
Bordereau#		e-874205	e-874205		
	UNITÉS	B1	B2	LDR	Lot CQ
CONVENTIONNELS					
Conductivité	mS/cm	0.17	0.17	N/A	1179291
pH	pH	8.61	8.70	N/A	1179268

N/A = Non Applicable
LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité
A, B, C, : Ces critères proviennent de l'Annexe 2 de la "Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés. Pour les analyses de métaux(et métalloides) dans les sols, le critère A désigne la " Teneur de fond Secteur Basses-Terres du Saint-Laurent ".
A,B-eau souterraine: A=Critère pour fin de consommation; B=Critère pour la résurgence dans les eaux de surface ou infiltration dans les égouts.
Ces références ne sont rapportées qu'à titre indicatif et ne doivent être interprétées dans aucun autre contexte.

Figure-A V-9 Échantillons GTL1 et GTL2 de Gatineau lavés à l'hydrocyclonnage

Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B313206
Date du rapport: 2013/03/22

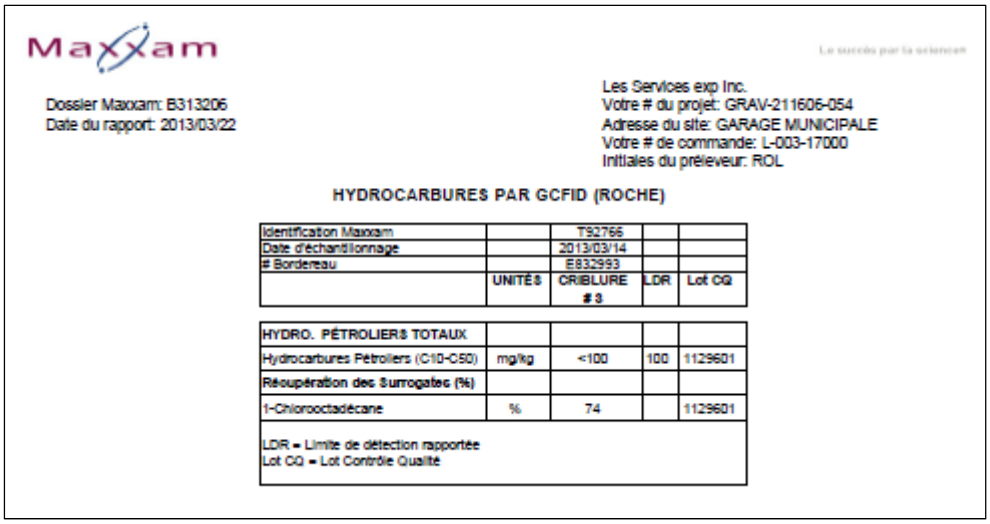
Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-211606-054
Adresse du site: GARAGE MUNICIPALE
Votre # de commande: L-003-17000
Initiales du préleveur: ROL

HAP PAR GCMS (ROCHE)

Identification Maxxam		T92766		
Date d'échantillonnage		2013/03/14		
# Bordereau		E832993		
	UNITÉS	**CRIBLURE #3**	**LDR**	**Lot CQ**
HAP				
Acénaphtène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Acénaphtylène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Anthracène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Benzo(a)anthracène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Benzo(a)pyrène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Benzo(j)fluoranthène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Benzo(k)fluoranthène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Benzo(b+j+k)fluoranthène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Benzo(c)phénanthrène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Chrysène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Dibenz(a,h)anthracène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Dibenzo(a,i)pyrène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Dibenzo(a,h)pyrène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Dibenzo(a,l)pyrène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
7,12-Diméthylbenzanthracène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Fluoranthène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Fluorène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
3-Méthylcholanthrène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Naphtalène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Phénanthrène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Pyrène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
2-Méthylnaphtalène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
1-Méthylnaphtalène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
1,3-Diméthylnaphtalène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
2,3,5-Triméthylnaphtalène	mg/kg	<0.1	0.1	1129602
Récupération des Surrogates (%)				
D10-Anthracène	%	93		1129602
D12-Benzo(a)pyrène	%	72		1129602

LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité

Figure-A V-10 Échantillons GRN de Granby



Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B313206
Date du rapport: 2013/03/22

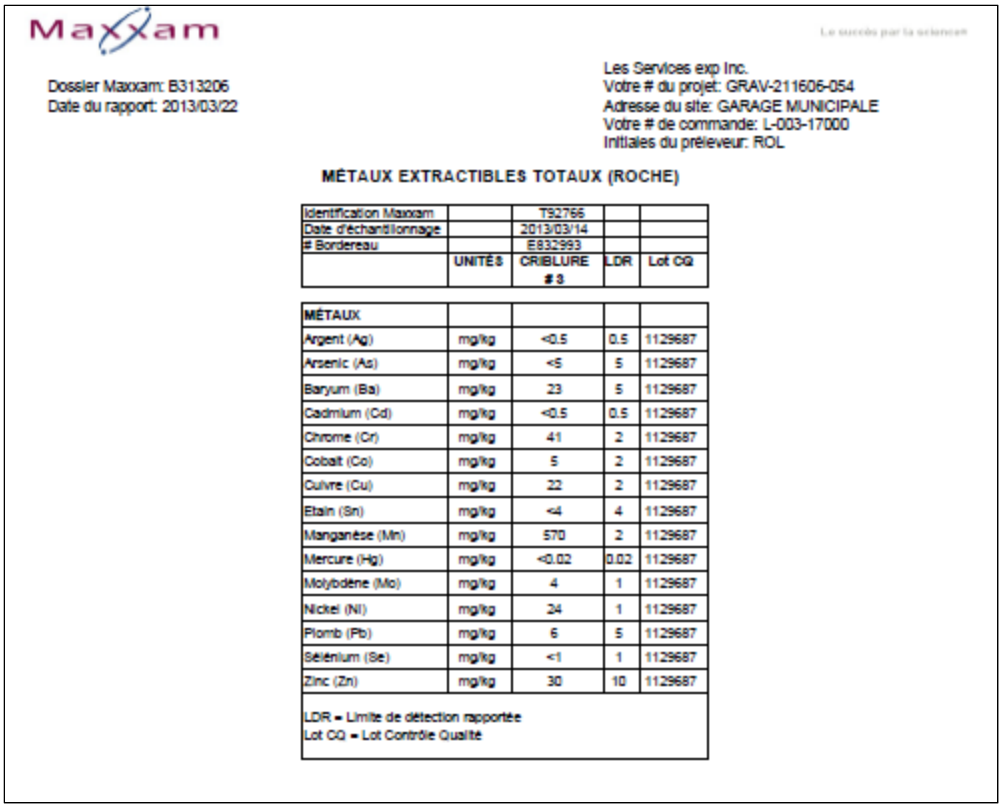
Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-211606-054
Adresse du site: GARAGE MUNICIPALE
Votre # de commande: L-003-17000
Initiales du préleveur: ROL

HYDROCARBURES PAR GCFID (ROCHE)

Identification Maxxam		T92766		
Date d'échantillonnage		2013/03/14		
# Bordereau		E832993		
	UNITÉS	**CRIBLURE #3**	**LDR**	**Lot CQ**
HYDRO. PÉTROLIERS TOTAUX				
Hydrocarbures Pétroliers (C10-C50)	mg/kg	<100	100	1129601
Récupération des Surrogates (%)				
1-Chlorooctadécane	%	74		1129601

LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité

Figure-A V-11 Échantillons GRN de Granby



Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B313206
Date du rapport: 2013/03/22

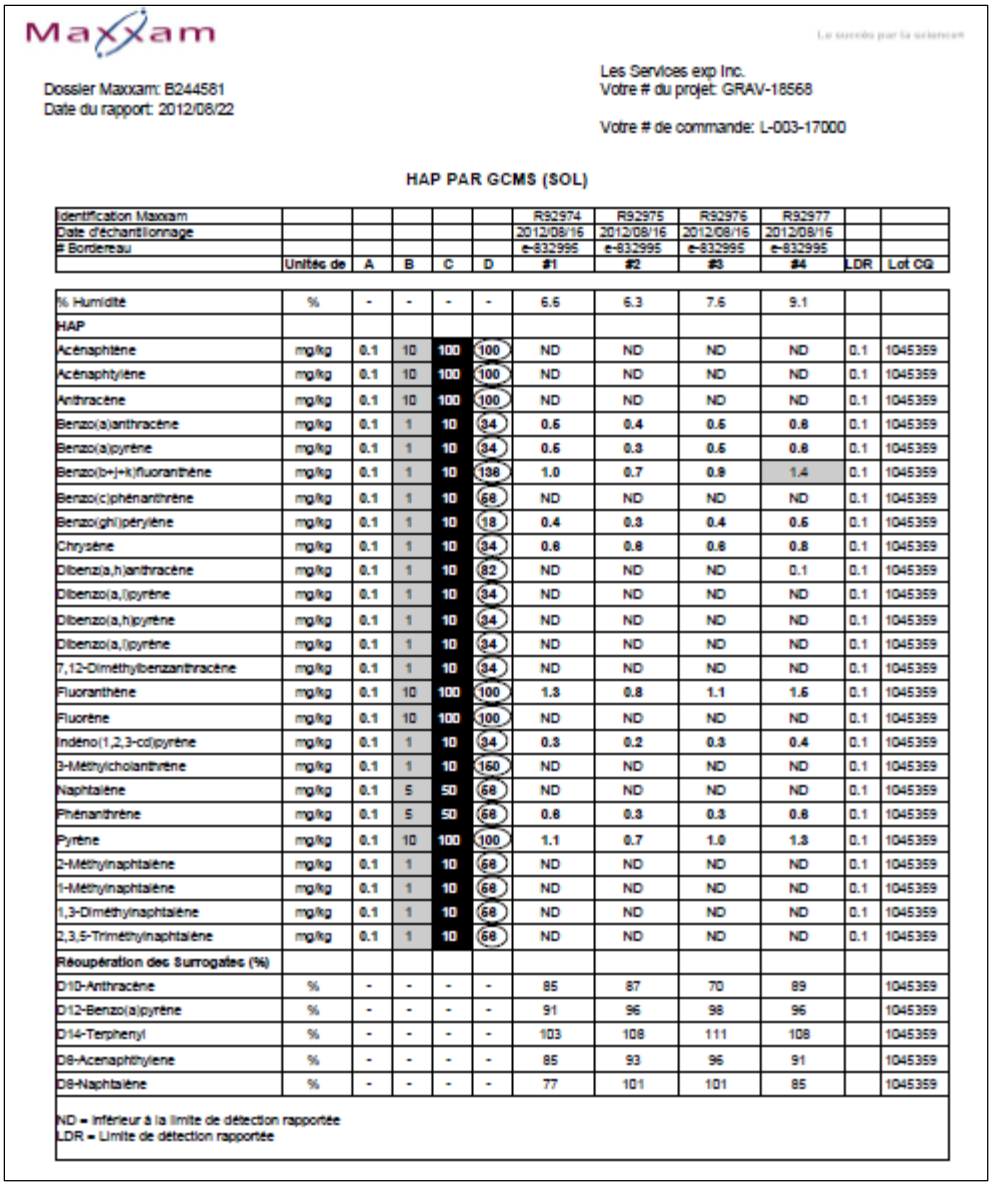
Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-211606-054
Adresse du site: GARAGE MUNICIPALE
Votre # de commande: L-003-17000
Initiales du préleveur: ROL

MÉTAUX EXTRACTIBLES TOTAUX (ROCHE)

Identification Maxxam		T92766		
Date d'échantillonnage		2013/03/14		
# Bordereau		E832993		
	UNITÉS	**CRIBLURE #3**	**LDR**	**Lot CQ**
MÉTAUX				
Argent (Ag)	mg/kg	<0.5	0.5	1129687
Arsenic (As)	mg/kg	<5	5	1129687
Baryum (Ba)	mg/kg	23	5	1129687
Cadmium (Cd)	mg/kg	<0.5	0.5	1129687
Chrome (Cr)	mg/kg	41	2	1129687
Cobalt (Co)	mg/kg	5	2	1129687
Cuivre (Cu)	mg/kg	22	2	1129687
Etain (Sn)	mg/kg	<4	4	1129687
Manganèse (Mn)	mg/kg	570	2	1129687
Mercure (Hg)	mg/kg	<0.02	0.02	1129687
Molybdène (Mo)	mg/kg	4	1	1129687
Nickel (Ni)	mg/kg	24	1	1129687
Plomb (Pb)	mg/kg	6	5	1129687
Sélénium (Se)	mg/kg	<1	1	1129687
Zinc (Zn)	mg/kg	30	10	1129687

LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité

Figure-A V-12 Échantillons GRN de Granby



Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B244581
Date du rapport: 2012/08/22

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568

Votre # de commande: L-003-17000

HAP PAR GCMS (SOL)

Identification Maxxam						R92974	R92975	R92976	R92977		
Date d'échantillonnage						2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16		
# Bordereau						e-832995	e-832995	e-832995	e-832995		
	Unités de	A	B	C	D	#1	#2	#3	#4	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	-	6.6	6.3	7.6	9.1		
HAP											
Acénaphtène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Acénaphtylène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Anthracène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Benzo(a)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.6	0.4	0.6	0.8	0.1	1045359
Benzo(a)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.6	0.3	0.6	0.8	0.1	1045359
Benzo(b+j+k)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	138	1.0	0.7	0.9	1.4	0.1	1045359
Benzo(c)phénanthrène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg	0.1	1	10	18	0.4	0.3	0.4	0.6	0.1	1045359
Chrysène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.8	0.8	0.8	0.8	0.1	1045359
Dibenz(a,h)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	82	ND	ND	ND	0.1	0.1	1045359
Dibenzo(a,i)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,h)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,i)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
7,12-Diméthylbenzanthracène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Fluoranthène	mg/kg	0.1	10	100	100	1.3	0.8	1.1	1.6	0.1	1045359
Fluorène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.3	0.2	0.3	0.4	0.1	1045359
3-Méthylcholanthrène	mg/kg	0.1	1	10	160	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Naphtalène	mg/kg	0.1	5	50	68	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Phénanthrène	mg/kg	0.1	5	50	68	0.6	0.3	0.3	0.8	0.1	1045359
Pyrène	mg/kg	0.1	10	100	100	1.1	0.7	1.0	1.3	0.1	1045359
2-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
1-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
1,3-Diméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
2,3,5-Triméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Réoupération des Surrogates (%)											
D10-Anthracène	%	-	-	-	-	85	87	70	89		1045359
D12-Benzo(a)pyrène	%	-	-	-	-	91	96	98	96		1045359
D14-Terphenyl	%	-	-	-	-	103	108	111	108		1045359
D8-Acenaphthylene	%	-	-	-	-	85	93	96	91		1045359
D8-Naphtalène	%	-	-	-	-	77	101	101	85		1045359

ND = Inférieur à la limite de détection rapportée
LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A V-13 Échantillons GRD de Granby

Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B244581
Date du rapport: 2012/08/22

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568

Votre # de commande: L-003-17000

HAP PAR GCMS (SOL)

Identification Maxxam						R92977		R92977	R92978		
Date d'échantillonnage						2012/08/16		2012/08/16	2012/08/16		
# Bordereau						e-832995		e-832995	e-832995		
	Unités de	A	B	C	D	#4 RÉPÉTÉ	Lot CQ	#4 Dup. de Lab.	#6	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	-	9.1		9.1	9.9		
HAP											
Acénaphtène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	1046159	0.8	ND	0.1	1045359
Acénaphtylène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	1046159	ND	ND	0.1	1045359
Anthracène	mg/kg	0.1	10	100	100	0.1	1046159	1.1 (1)	ND	0.1	1045359
Benzo(a)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.8	1046159	4.6 (1)	0.2	0.1	1045359
Benzo(a)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.8	1046159	3.6 (1)	0.3	0.1	1045359
Benzo(b+j+k)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	138	1.3	1046159	7.4 (1)	0.8	0.1	1045359
Benzo(c)phénanthrène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	1046159	0.8 (1)	ND	0.1	1045359
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg	0.1	1	10	18	0.5	1046159	2.2 (1)	0.2	0.1	1045359
Chrysène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.9	1046159	4.6 (1)	0.3	0.1	1045359
Dibenz(a,h)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	82	ND	1046159	0.8 (1)	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,i)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	1046159	0.3	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,h)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	1046159	ND	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,l)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	1046159	ND	ND	0.1	1045359
7,12-Diméthylbenzanthracène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	1046159	ND	ND	0.1	1045359
Fluoranthène	mg/kg	0.1	10	100	100	1.9	1046159	11 (1)	0.8	0.1	1045359
Fluorène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	1046159	0.7 (1)	ND	0.1	1045359
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.5	1046159	2.1 (1)	0.2	0.1	1045359
3-Méthylcholanthrène	mg/kg	0.1	1	10	150	ND	1046159	0.1	ND	0.1	1045359
Naphtalène	mg/kg	0.1	5	50	68	ND	1046159	ND	ND	0.1	1045359
Phénanthrène	mg/kg	0.1	5	50	68	0.8	1046159	6.5 (1)	0.2	0.1	1045359
Pyrène	mg/kg	0.1	10	100	100	1.5	1046159	8.4 (1)	0.6	0.1	1045359
2-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	1046159	ND	ND	0.1	1045359
1-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	1046159	ND	ND	0.1	1045359
1,3-Diméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	1046159	ND	ND	0.1	1045359
2,3,5-Triméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	1046159	ND	ND	0.1	1045359
Récupération des Surrogates (%)											
D10-Anthracène	%	-	-	-	-	90	1046159	92	88		1045359
D12-Benzo(a)pyrène	%	-	-	-	-	84	1046159	97	95		1045359
D14-Terphenyl	%	-	-	-	-	110	1046159	110	108		1045359

ND = Inférieur à la limite de détection rapportée
LDR = Limite de détection rapportée
(1) Les résultats du duplicata excèdent le critère d'acceptabilité pour le RPD. Ceci est probablement dû à l'hétérogénéité de l'échantillon.

Figure-A V-14 Échantillons GRD de Granby

Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B244581
Date du rapport: 2012/08/22

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568

Votre # de commande: L-003-17000

HAP PAR GCMS (SOL)

Identification Maxxam						R92979	R92980	R92981	R92982		
Date d'échantillonnage						2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16		
# Bordereau						e-832995	e-832995	e-832995	e-832995		
	Unités de	A	B	C	D	#8	#8-1	#7	#8	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	-	5.9	5.6	6.6	9.1		
HAP											
Acénaphtène	mg/kg	0.1	10	100	(100)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Acénaphtylène	mg/kg	0.1	10	100	(100)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Anthracène	mg/kg	0.1	10	100	(100)	ND	0.1	ND	ND	0.1	1045359
Benzo(a)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	(34)	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	1045359
Benzo(a)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	(34)	0.3	0.4	0.4	0.4	0.1	1045359
Benzo(b+j+k)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	(138)	0.7	0.7	0.9	0.8	0.1	1045359
Benzo(c)phénanthrène	mg/kg	0.1	1	10	(68)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg	0.1	1	10	(18)	0.2	0.3	0.3	0.3	0.1	1045359
Chrysène	mg/kg	0.1	1	10	(34)	0.4	0.4	0.6	0.5	0.1	1045359
Dibenz(a,h)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	(82)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,i)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	(34)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,h)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	(34)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,l)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	(34)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
7,12-Diméthylbenzanthracène	mg/kg	0.1	1	10	(34)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Fluoranthène	mg/kg	0.1	10	100	(100)	0.7	0.9	1.1	0.8	0.1	1045359
Fluorène	mg/kg	0.1	10	100	(100)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	(34)	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	1045359
3-Méthylcholanthrène	mg/kg	0.1	1	10	(160)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Naphtalène	mg/kg	0.1	5	50	(68)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Phénanthrène	mg/kg	0.1	5	50	(68)	0.3	0.6	0.4	0.3	0.1	1045359
Pyrène	mg/kg	0.1	10	100	(100)	0.6	0.7	0.9	0.7	0.1	1045359
2-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	(68)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
1-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	(68)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
1,3-Diméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	(68)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
2,3,5-Triméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	(68)	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Récupération des Surrogates (%)											
D10-Anthracène	%	-	-	-	-	92	92	93	92		1045359
D12-Benzo(a)pyrène	%	-	-	-	-	100	100	98	99		1045359
D14-Terphenyl	%	-	-	-	-	113	113	112	112		1045359
D8-Acenaphthylene	%	-	-	-	-	98	78	99	99		1045359
D8-Naphtalène	%	-	-	-	-	104	76	104	103		1045359

ND = Inférieur à la limite de détection rapportée
LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A V-15 Échantillons GRD de Granby

Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B244581
Date du rapport: 2012/08/22

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568

Votre # de commande: L-003-17000

HAP PAR GCMS (SOL)

Identification Maxxam						R92983	R92984	R92993	R92994		
Date d'échantillonnage						2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16		
# Bordereau						e-832995	e-832995	e-832996	e-832996		
	Unités de	A	B	C	D	#9	#10	#12	#13	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	-	4.7	5.9	4.5	5.1		
HAP											
Acénaphtène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Acénaphtylène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Anthracène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Benzo(a)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.2	0.3	0.4	0.4	0.1	1045359
Benzo(a)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.2	0.3	0.5	0.4	0.1	1045359
Benzo(b+j+k)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	138	0.5	0.7	1.0	0.8	0.1	1045359
Benzo(c)phénanthrène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg	0.1	1	10	18	0.2	0.3	0.3	0.3	0.1	1045359
Chrysène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	1045359
Dibenz(a,h)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	82	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,i)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,h)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,l)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
7,12-Diméthylbenzanthracène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Fluoranthène	mg/kg	0.1	10	100	100	0.5	0.7	1.0	1.0	0.1	1045359
Fluorène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	1045359
3-Méthylcholanthrène	mg/kg	0.1	1	10	160	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Naphtalène	mg/kg	0.1	5	50	68	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Phénanthrène	mg/kg	0.1	5	50	68	0.1	0.2	0.4	0.3	0.1	1045359
Pyrène	mg/kg	0.1	10	100	100	0.4	0.6	0.8	0.8	0.1	1045359
2-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
1-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
1,3-Diméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
2,3,5-Triméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	ND	ND	0.1	1045359
Récupération des Surrogates (%)											
D10-Anthracène	%	-	-	-	-	65	97	92	74		1045359
D12-Benzo(a)pyrène	%	-	-	-	-	93	104	101	104		1045359
D14-Terphenyl	%	-	-	-	-	105	116	112	117		1045359
D8-Acenaphthylene	%	-	-	-	-	93	103	99	103		1045359
D8-Naphtalène	%	-	-	-	-	97	106	102	105		1045359

ND = Inférieur à la limite de détection rapportée
LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A V-16 Échantillons GRD de Granby

Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B244581
Date du rapport: 2012/08/22

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568

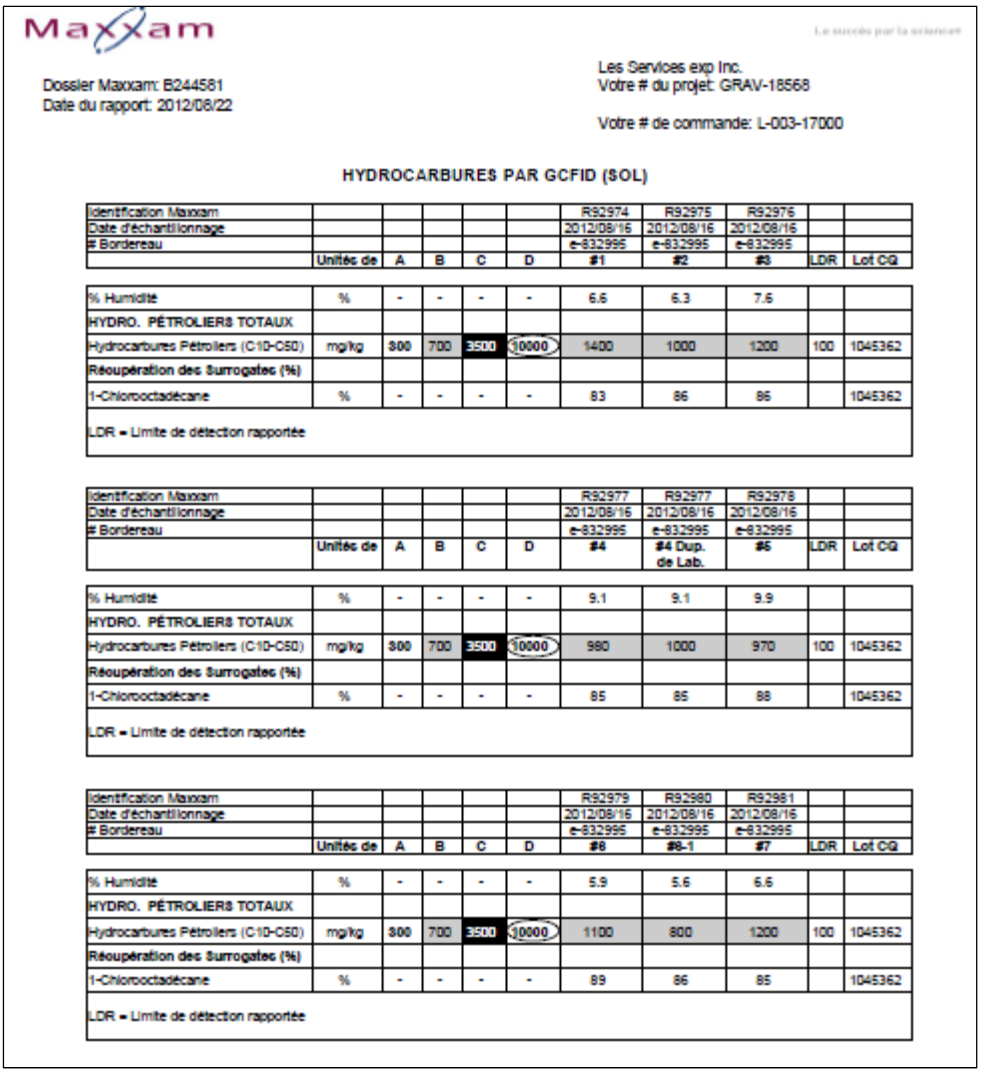
Votre # de commande: L-003-17000

HAP PAR GCMS (SOL)

Identification Maxxam						R92995		
Date d'échantillonnage						2012/08/16		
# Bordereau						e-832996		
	Unités de	A	B	C	D	#14	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	-	6.4		
HAP								
Acénaphtène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	0.1	1045359
Acénaphtylène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	0.1	1045359
Anthracène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	0.1	1045359
Benzo(a)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.2	0.1	1045359
Benzo(a)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.3	0.1	1045359
Benzo(b+j+k)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	138	0.8	0.1	1045359
Benzo(c)phénanthrène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	0.1	1045359
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg	0.1	1	10	18	0.2	0.1	1045359
Chrysène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.4	0.1	1045359
Dibenzo(a,h)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	82	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,i)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,h)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	0.1	1045359
Dibenzo(a,l)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	0.1	1045359
7,12-Diméthylbenzanthracène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	0.1	1045359
Fluoranthène	mg/kg	0.1	10	100	100	0.7	0.1	1045359
Fluorène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	0.1	1045359
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.2	0.1	1045359
3-Méthylcholanthrène	mg/kg	0.1	1	10	160	ND	0.1	1045359
Naphtalène	mg/kg	0.1	5	50	68	ND	0.1	1045359
Phénanthrène	mg/kg	0.1	5	50	68	0.2	0.1	1045359
Pyrène	mg/kg	0.1	10	100	100	0.6	0.1	1045359
2-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	0.1	1045359
1-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	0.1	1045359
1,3-Diméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	0.1	1045359
2,3,5-Triméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	0.1	1045359
Réoupération des Surrogates (%)								
D10-Anthracène	%	-	-	-	-	70		1045359
D12-Benzo(a)pyrène	%	-	-	-	-	98		1045359
D14-Terphenyl	%	-	-	-	-	111		1045359
D8-Acenaphthylene	%	-	-	-	-	98		1045359
D8-Naphtalène	%	-	-	-	-	100		1045359

ND = Inférieur à la limite de détection rapportée
LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A V-17 Échantillons GRD de Granby



Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B244581
Date du rapport: 2012/08/22

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568

Votre # de commande: L-003-17000

HYDROCARBURES PAR GCFID (SOL)

Identification Maxxam						R92974	R92975	R92976		
Date d'échantillonnage						2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16		
# Bordereau						e-832995	e-832995	e-832995		
	Unités de	**A**	**B**	**C**	**D**	**#1**	**#2**	**#3**	**LDR**	**Lot CQ**
% Humidité	%	-	-	-	-	6.6	6.3	7.6		
HYDRO. PÉTROLIERS TOTAUX										
Hydrocarbures Pétroliers (C10-C50)	mg/kg	300	700	3500	10000	1400	1000	1200	100	1045362
Réoupération des Surrogates (%)										
1-Chlorooctadécane	%	-	-	-	-	83	86	86		1045362

LDR = Limite de détection rapportée

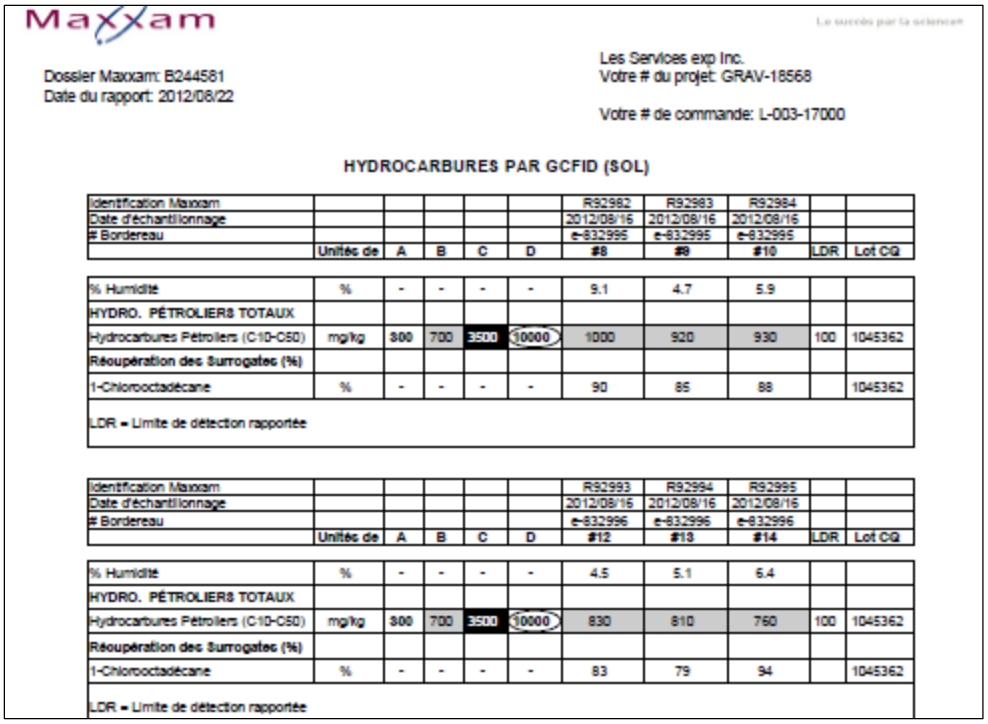
Identification Maxxam						R92977	R92977	R92978		
Date d'échantillonnage						2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16		
# Bordereau						e-832995	e-832995	e-832995		
	Unités de	**A**	**B**	**C**	**D**	**#4**	**#4 Dup. de Lab.**	**#5**	**LDR**	**Lot CQ**
% Humidité	%	-	-	-	-	9.1	9.1	9.9		
HYDRO. PÉTROLIERS TOTAUX										
Hydrocarbures Pétroliers (C10-C50)	mg/kg	300	700	3500	10000	980	1000	970	100	1045362
Réoupération des Surrogates (%)										
1-Chlorooctadécane	%	-	-	-	-	85	85	88		1045362

LDR = Limite de détection rapportée

Identification Maxxam						R92979	R92980	R92981		
Date d'échantillonnage						2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16		
# Bordereau						e-832995	e-832995	e-832995		
	Unités de	**A**	**B**	**C**	**D**	**#6**	**#6-1**	**#7**	**LDR**	**Lot CQ**
% Humidité	%	-	-	-	-	5.9	5.6	6.6		
HYDRO. PÉTROLIERS TOTAUX										
Hydrocarbures Pétroliers (C10-C50)	mg/kg	300	700	3500	10000	1100	800	1200	100	1045362
Réoupération des Surrogates (%)										
1-Chlorooctadécane	%	-	-	-	-	89	86	85		1045362

LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A V-18 Échantillons GRD de Granby



Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B244581
Date du rapport: 2012/08/22

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568

Votre # de commande: L-003-17000

HYDROCARBURES PAR GCFID (SOL)

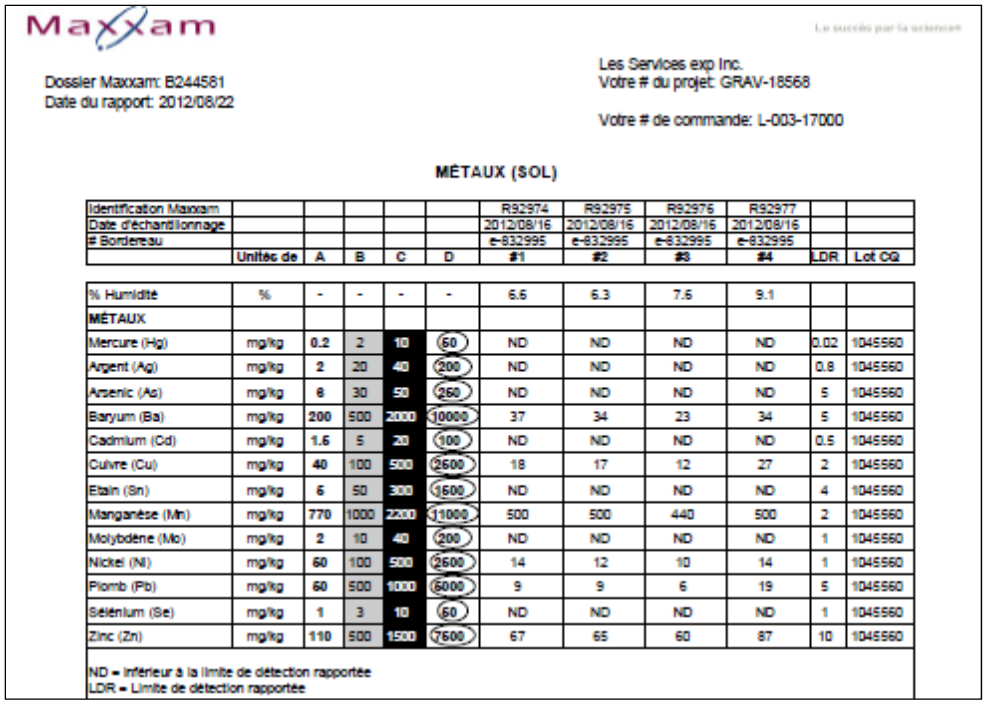
Identification Maxxam						R92982	R92983	R92984		
Date d'échantillonnage						2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16		
# Bordereau						e-832995	e-832995	e-832995		
	Unités de	**A**	**B**	**C**	**D**	**#8**	**#9**	**#10**	**LDR**	**Lot CQ**
% Humidité	%	-	-	-	-	9.1	4.7	5.9		
HYDRO. PÉTROLIERS TOTAUX										
Hydrocarbures Pétroliers (C10-C50)	mg/kg	300	700	3500	10000	1000	920	930	100	1045362
Récupération des Surrogates (%)										
1-Chlorooctadécane	%	-	-	-	-	90	85	88		1045362

LDR = Limite de détection rapportée

Identification Maxxam						R92993	R92994	R92995		
Date d'échantillonnage						2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16		
# Bordereau						e-832996	e-832996	e-832996		
	Unités de	**A**	**B**	**C**	**D**	**#12**	**#13**	**#14**	**LDR**	**Lot CQ**
% Humidité	%	-	-	-	-	4.5	5.1	6.4		
HYDRO. PÉTROLIERS TOTAUX										
Hydrocarbures Pétroliers (C10-C50)	mg/kg	300	700	3500	10000	830	810	760	100	1045362
Récupération des Surrogates (%)										
1-Chlorooctadécane	%	-	-	-	-	83	79	94		1045362

LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A V-19 Échantillons GRD de Granby



Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B244581
Date du rapport: 2012/08/22

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568

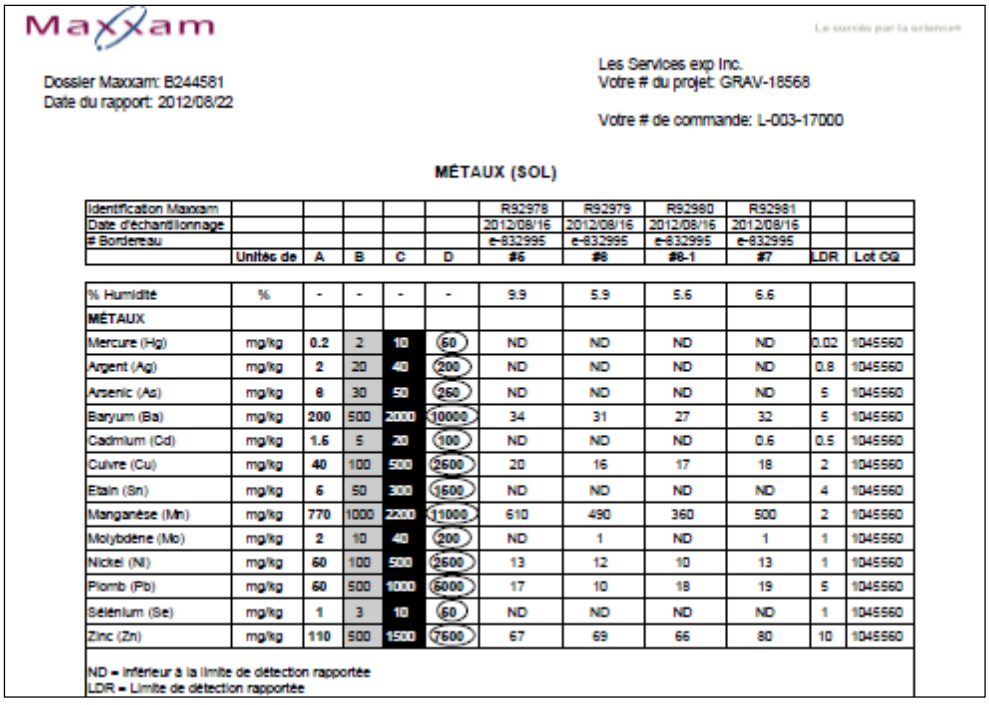
Votre # de commande: L-003-17000

MÉTAUX (SOL)

Identification Maxxam						R92974	R92975	R92976	R92977		
Date d'échantillonnage						2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16		
# Bordereau						e-832995	e-832995	e-832995	e-832995		
	Unités de	A	B	C	D	#1	#2	#3	#4	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	-	6.6	6.3	7.6	9.1		
MÉTAUX											
Mercure (Hg)	mg/kg	0.2	2	10	60	ND	ND	ND	ND	0.02	1045560
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200	ND	ND	ND	ND	0.8	1045560
Arsenic (As)	mg/kg	8	30	50	260	ND	ND	ND	ND	5	1045560
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2000	10000	37	34	23	34	5	1045560
Cadmium (Cd)	mg/kg	1.6	5	20	100	ND	ND	ND	ND	0.5	1045560
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2600	18	17	12	27	2	1045560
Etain (Sn)	mg/kg	6	50	300	1500	ND	ND	ND	ND	4	1045560
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1000	2200	11000	500	500	440	500	2	1045560
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200	ND	ND	ND	ND	1	1045560
Nickel (Ni)	mg/kg	60	100	500	2600	14	12	10	14	1	1045560
Plomb (Pb)	mg/kg	60	500	1000	6000	9	9	6	19	5	1045560
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	60	ND	ND	ND	ND	1	1045560
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1500	7600	67	65	60	87	10	1045560

ND = Inférieur à la limite de détection rapportée
LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A V-20 Échantillons GRD de Granby



Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B244581
Date du rapport: 2012/08/22

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568

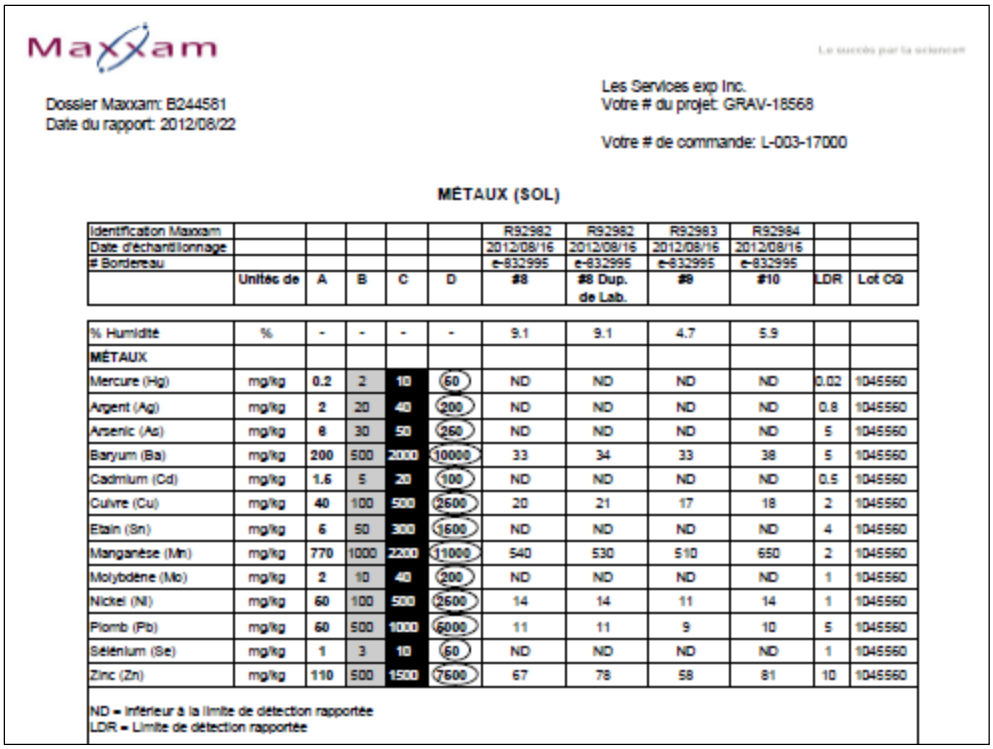
Votre # de commande: L-003-17000

MÉTAUX (SOL)

Identification Maxxam						R92978	R92979	R92980	R92981		
Date d'échantillonnage						2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16		
# Bordereau						e-832995	e-832995	e-832995	e-832995		
	Unités de	A	B	C	D	#6	#8	#8-1	#7	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	-	9.9	5.9	5.6	6.6		
MÉTAUX											
Mercure (Hg)	mg/kg	0.2	2	10	60	ND	ND	ND	ND	0.02	1045560
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200	ND	ND	ND	ND	0.8	1045560
Arsenic (As)	mg/kg	8	30	50	260	ND	ND	ND	ND	5	1045560
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2000	10000	34	31	27	32	5	1045560
Cadmium (Cd)	mg/kg	1.6	5	20	100	ND	ND	ND	0.6	0.5	1045560
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2600	20	16	17	18	2	1045560
Etain (Sn)	mg/kg	6	50	300	1500	ND	ND	ND	ND	4	1045560
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1000	2200	11000	610	490	360	500	2	1045560
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200	ND	1	ND	1	1	1045560
Nickel (Ni)	mg/kg	60	100	500	2600	13	12	10	13	1	1045560
Plomb (Pb)	mg/kg	60	500	1000	6000	17	10	18	19	5	1045560
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	60	ND	ND	ND	ND	1	1045560
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1500	7600	67	69	66	80	10	1045560

ND = Inférieur à la limite de détection rapportée
LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A V-21 Échantillons GRD de Granby



Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B244581
Date du rapport: 2012/08/22

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568

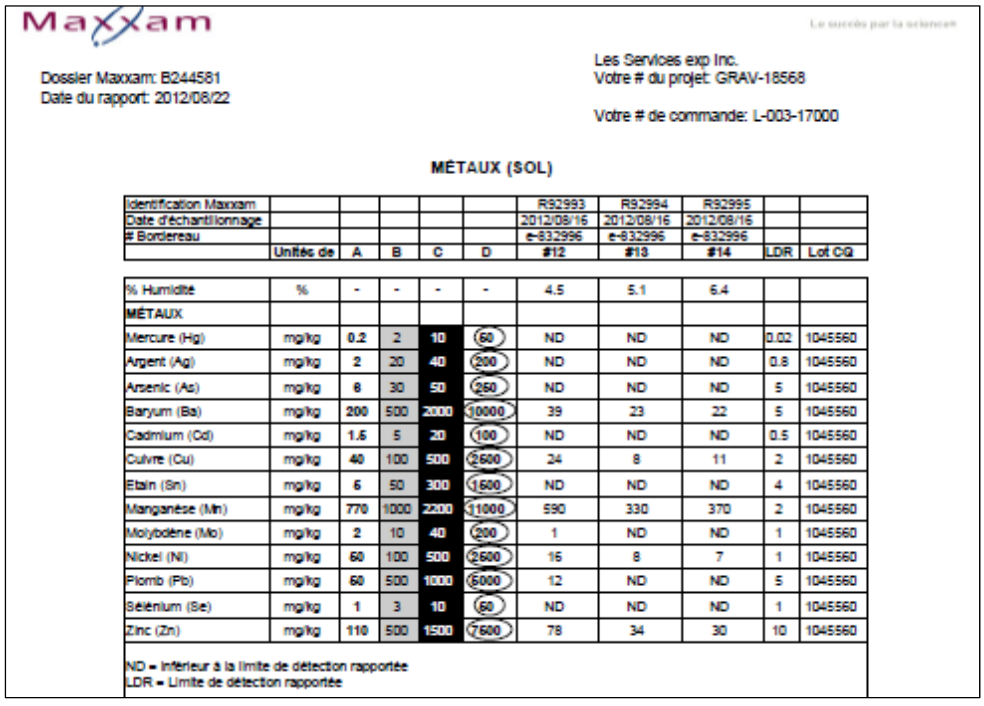
Votre # de commande: L-003-17000

MÉTAUX (SOL)

Identification Maxxam						R92982	R92982	R92983	R92984		
Date d'échantillonnage						2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16		
# Bordereau						e-832995	e-832995	e-832995	e-832995		
	Unités de	A	B	C	D	#8	#8 Dup. de Lab.	#9	#10	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	-	9.1	9.1	4.7	5.9		
MÉTAUX											
Mercure (Hg)	mg/kg	0.2	2	10	60	ND	ND	ND	ND	0.02	1045560
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200	ND	ND	ND	ND	0.8	1045560
Arsenic (As)	mg/kg	8	30	50	250	ND	ND	ND	ND	5	1045560
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2000	10000	33	34	33	38	5	1045560
Cadmium (Cd)	mg/kg	1.5	5	20	100	ND	ND	ND	ND	0.5	1045560
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2600	20	21	17	18	2	1045560
Etain (Sn)	mg/kg	6	50	300	1500	ND	ND	ND	ND	4	1045560
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1000	2200	11000	540	530	510	650	2	1045560
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200	ND	ND	ND	ND	1	1045560
Nickel (Ni)	mg/kg	60	100	500	2600	14	14	11	14	1	1045560
Plomb (Pb)	mg/kg	60	500	1000	5000	11	11	9	10	5	1045560
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	60	ND	ND	ND	ND	1	1045560
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1500	7600	67	78	58	81	10	1045560

ND = Inférieur à la limite de détection rapportée
LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A V-22 Échantillons GRD de Granby



Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B244581
Date du rapport: 2012/08/22

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568

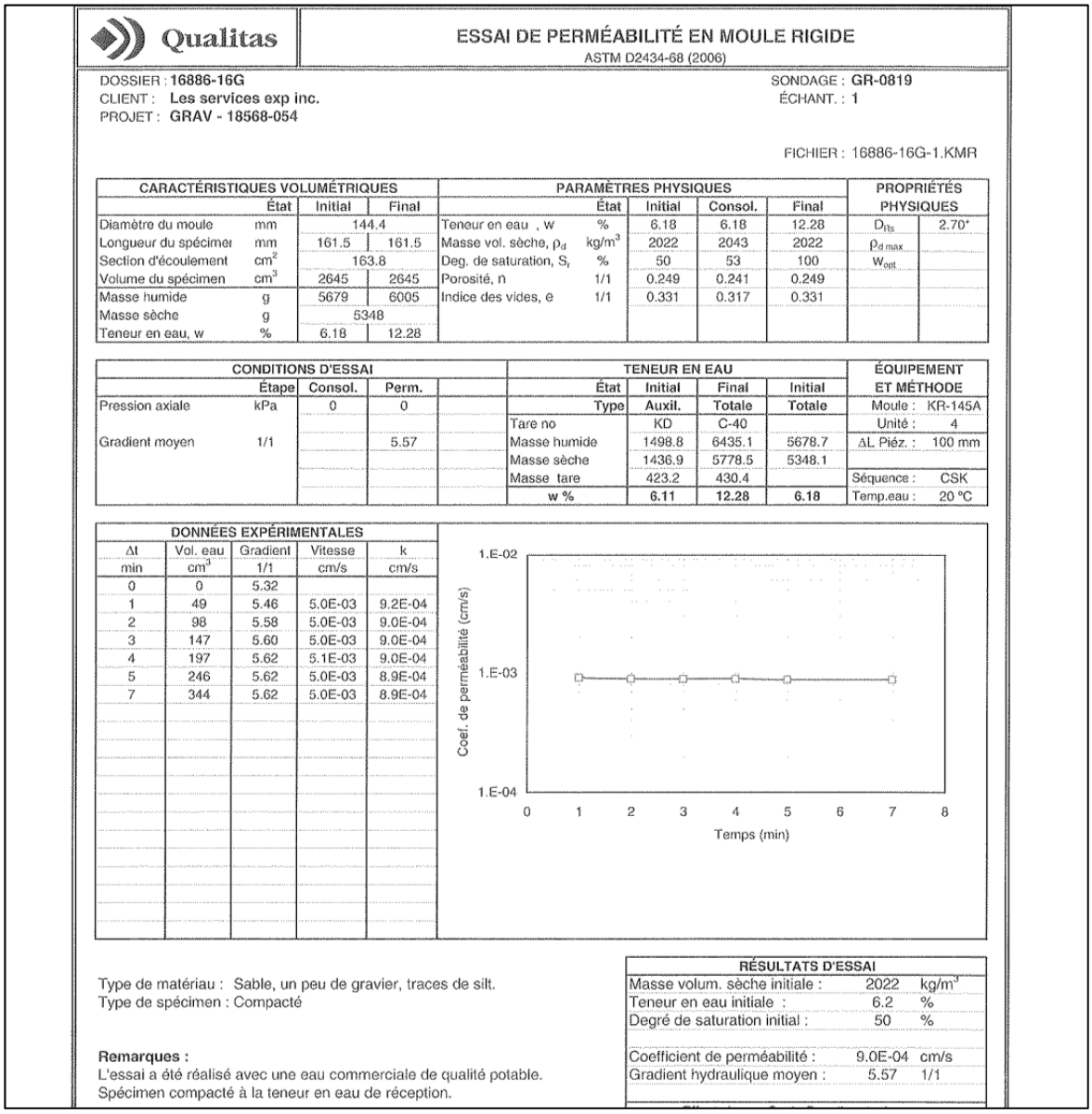
Votre # de commande: L-003-17000

MÉTAUX (SOL)

Identification Maxxam						R92993	R92994	R92995		
Date d'échantillonnage						2012/08/16	2012/08/16	2012/08/16		
# Bordereau						e-832996	e-832996	e-832996		
	Unités de	A	B	C	D	#12	#13	#14	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	-	4.5	5.1	6.4		
MÉTAUX										
Mercure (Hg)	mg/kg	0.2	2	10	60	ND	ND	ND	0.02	1045560
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200	ND	ND	ND	0.8	1045560
Arsenic (As)	mg/kg	8	30	50	250	ND	ND	ND	5	1045560
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2000	10000	39	23	22	5	1045560
Cadmium (Cd)	mg/kg	1.5	5	20	100	ND	ND	ND	0.5	1045560
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2600	24	8	11	2	1045560
Etain (Sn)	mg/kg	6	50	300	1500	ND	ND	ND	4	1045560
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1000	2200	11000	590	330	370	2	1045560
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200	1	ND	ND	1	1045560
Nickel (Ni)	mg/kg	60	100	500	2600	16	8	7	1	1045560
Plomb (Pb)	mg/kg	60	500	1000	5000	12	ND	ND	5	1045560
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	60	ND	ND	ND	1	1045560
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1500	7600	78	34	30	10	1045560

ND = Inférieur à la limite de détection rapportée
LDR = Limite de détection rapportée

Figure-A V-23 Échantillons GRD de Granby



Qualitas

ESSAI DE PERMÉABILITÉ EN MOULE RIGIDE
ASTM D2434-68 (2006)

DOSSIER : 16886-16G
CLIENT : Les services exp inc.
PROJET : GRAV - 18568-054

SONDAGE : GR-0819
ÉCHANT. : 1

FICHIER : 16886-16G-1.KMR

CARACTÉRISTIQUES VOLUMÉTRIQUES			
	État	Initial	Final
Diamètre du moule	mm	144.4	
Longueur du spécimen	mm	161.5	161.5
Section d'écoulement	cm^2	163.8	
Volume du spécimen	cm^3	2645	2645
Masse humide	g	5679	6005
Masse sèche	g	5348	
Teneur en eau, w	%	6.18	12.28

PARAMÈTRES PHYSIQUES					
	État	Initial	Consol.	Final	
Teneur en eau , w	%	6.18	6.18	12.28	
Masse vol. sèche, ρ_d	kg/m^3	2022	2043	2022	
Deg. de saturation, S_r	%	50	53	100	
Porosité, n	1/1	0.249	0.241	0.249	
Indice des vides, e	1/1	0.331	0.317	0.331	

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	
D_{lts}	2.70*
$\rho_{d\,max}$	
w_{opt}	

CONDITIONS D'ESSAI				
	Étape	Consol.	Perm.	
Pression axiale	kPa	0	0	
Gradient moyen	1/1		5.57	

TENEUR EN EAU				
État	Initial	Final	Initial	
Type	Auxil.	Totale	Totale	
Tare no	KD	C-40		
Masse humide	1498.8	6435.1	5678.7	
Masse sèche	1436.9	5778.5	5348.1	
Masse tare	423.2	430.4		
w %	6.11	12.28	6.18	

ÉQUIPEMENT ET MÉTHODE	
Moule :	KR-145A
Unité :	4
ΔL Piéz. :	100 mm
Séquence :	CSK
Temp.eau :	20 °C

DONNÉES EXPÉRIMENTALES

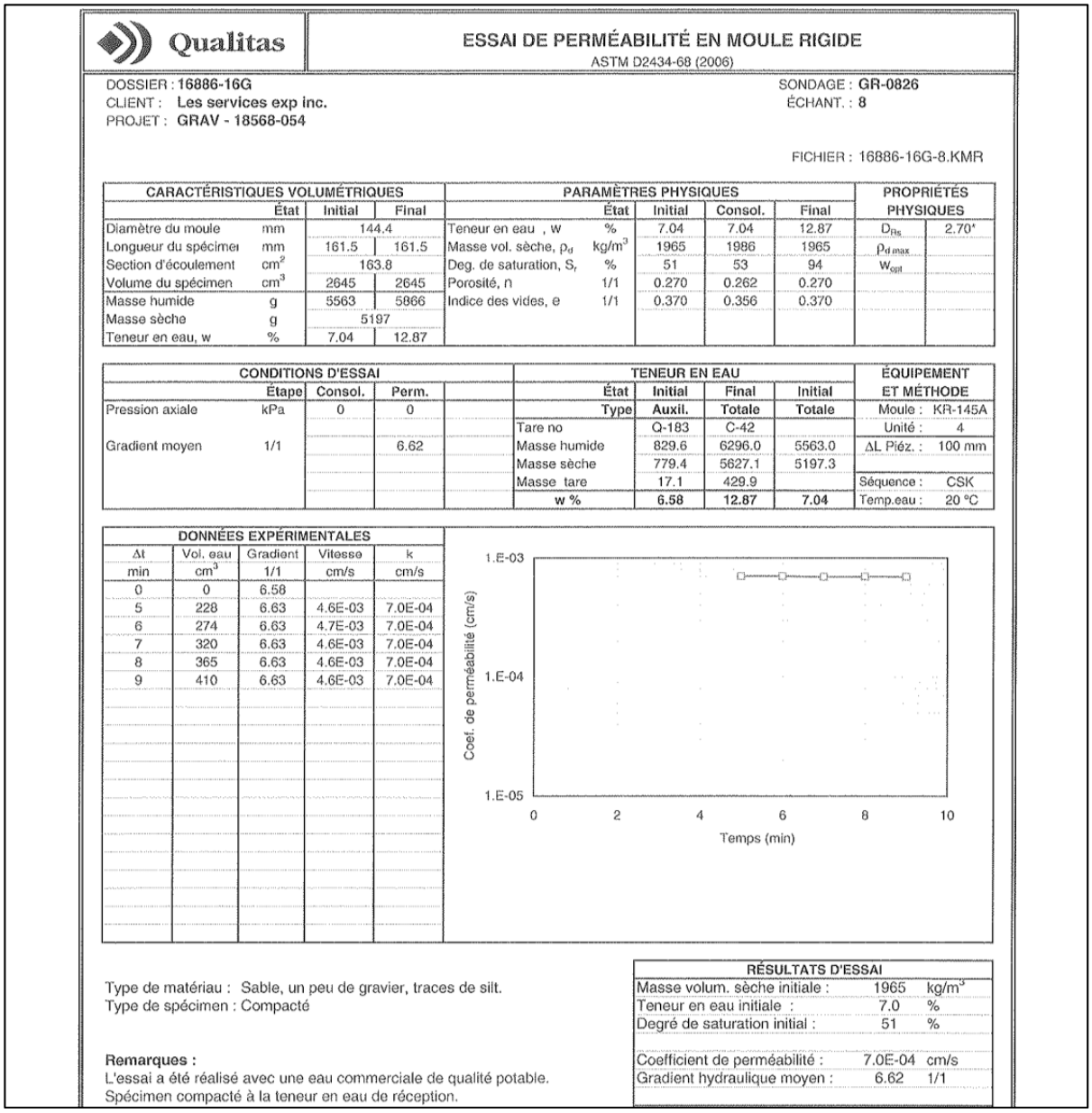
Δt min	Vol. eau cm^3	Gradient 1/1	Vitesse cm/s	k cm/s
0	0	5.32		
1	49	5.46	5.0E-03	9.2E-04
2	98	5.58	5.0E-03	9.0E-04
3	147	5.60	5.0E-03	9.0E-04
4	197	5.62	5.1E-03	9.0E-04
5	246	5.62	5.0E-03	8.9E-04
7	344	5.62	5.0E-03	8.9E-04

Type de matériau : Sable, un peu de gravier, traces de silt.
Type de spécimen : Compacté

Remarques :
L'essai a été réalisé avec une eau commerciale de qualité potable.
Spécimen compacté à la teneur en eau de réception.

RÉSULTATS D'ESSAI		
Masse volum. sèche initiale :	2022	kg/m^3
Teneur en eau initiale :	6.2	%
Degré de saturation initial :	50	%
Coefficient de perméabilité :	9.0E-04	cm/s
Gradient hydraulique moyen :	5.57	1/1

Figure-A V-24 Essai de perméabilité des échantillons GRD de Granby



Qualitas

ESSAI DE PERMÉABILITÉ EN MOULE RIGIDE
ASTM D2434-68 (2006)

DOSSIER : 16886-16G
CLIENT : Les services exp inc.
PROJET : GRAV - 18568-054

SONDAGE : GR-0826
ÉCHANT. : 8

FICHIER : 16886-16G-8.KMR

CARACTÉRISTIQUES VOLUMÉTRIQUES				PARAMÈTRES PHYSIQUES					PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	
	État	Initial	Final		État	Initial	Consol.	Final		
Diamètre du moule mm		144.4		Teneur en eau , w %		7.04	7.04	12.87	D_{Rs}	2.70*
Longueur du spécimen mm		161.5	161.5	Masse vol. sèche, ρ_d kg/m^3		1965	1986	1965	$\rho_{d\,max}$	
Section d'écoulement cm^2		163.8		Deg. de saturation, S_r %		51	53	94	w_{opt}	
Volume du spécimen cm^3		2645	2645	Porosité, n 1/1		0.270	0.262	0.270		
Masse humide g		5563	5866	Indice des vides, e 1/1		0.370	0.356	0.370		
Masse sèche g		5197								
Teneur en eau, w %		7.04	12.87							

CONDITIONS D'ESSAI				TENEUR EN EAU				ÉQUIPEMENT ET MÉTHODE	
	Étape	Consol.	Perm.	État	Initial	Final	Initial		
Pression axiale kPa		0	0	Type	Auxil.	Totale	Totale	Moule :	KR-145A
				Tare no	Q-183	C-42		Unité :	4
Gradient moyen 1/1			6.62	Masse humide	829.6	6296.0	5563.0	ΔL Piéz. :	100 mm
				Masse sèche	779.4	5627.1	5197.3		
				Masse tare	17.1	429.9		Séquence :	CSK
				w %	6.58	12.87	7.04	Temp.eau :	20 °C

DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Δt	Vol. eau	Gradient	Vitesse	k
min	cm^3	1/1	cm/s	cm/s
0	0	6.58		
5	228	6.63	4.6E-03	7.0E-04
6	274	6.63	4.7E-03	7.0E-04
7	320	6.63	4.6E-03	7.0E-04
8	365	6.63	4.6E-03	7.0E-04
9	410	6.63	4.6E-03	7.0E-04

Type de matériau : Sable, un peu de gravier, traces de silt.
Type de spécimen : Compacté

Remarques :
L'essai a été réalisé avec une eau commerciale de qualité potable.
Spécimen compacté à la teneur en eau de réception.

RÉSULTATS D'ESSAI		
Masse volum. sèche initiale :	1965	kg/m^3
Teneur en eau initiale :	7.0	%
Degré de saturation initial :	51	%
Coefficient de perméabilité :	7.0E-04	cm/s
Gradient hydraulique moyen :	6.62	1/1

Figure-A V-25 Essai de perméabilité des échantillons GRD de Granby

Qualitas

ESSAI DE PERMÉABILITÉ EN MOULE RIGIDE

ASTM D2434-68 (2006)

DOSSIER : **16886-16G** SONDAGE : **GR-0827**
CLIENT : **Les services exp inc.** ÉCHANT. : **9**
PROJET : **GRAV - 18568-054**

FICHIER : 16886-16G-9.KMR

CARACTÉRISTIQUES VOLUMÉTRIQUES			
	État	Initial	Final
Diamètre du moule	mm	144.4	
Longueur du spécimen	mm	161.5	161.5
Section d'écoulement	cm^2	163.8	
Volume du spécimen	cm^3	2645	2645
Masse humide	g	5483	5923
Masse sèche	g	5229	
Teneur en eau, w	%	4.85	13.26

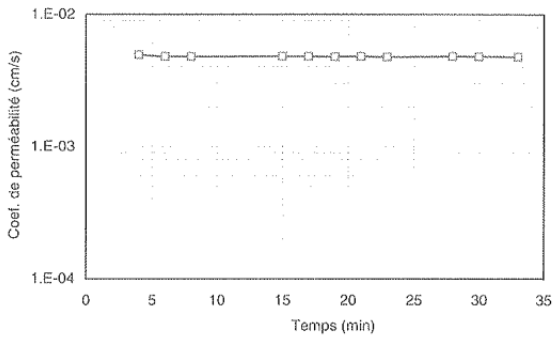
PARAMÈTRES PHYSIQUES					PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	
	État	Initial	Consol.	Final		
Teneur en eau , w	%	4.85	4.85	13.26	D_{Rs}	2.70*
Masse vol. sèche, ρ_d	kg/m^3	1977	1998	1977	$\rho_{d\,max}$	
Deg. de saturation, S_r	%	36	38	99	w_{opt}	
Porosité, n	1/1	0.266	0.258	0.266		
Indice des vides, e	1/1	0.362	0.347	0.362		

CONDITIONS D'ESSAI			
	Étape	Consol.	Perm.
Pression axiale	kPa	0	0
Gradient moyen	1/1		0.23

TENEUR EN EAU				ÉQUIPEMENT ET MÉTHODE	
État	Initial	Final	Initial		
Type	Auxil.	Totale	Totale		
Tare no	Q-248	C-40		Moule :	KR-145A
Masse humide	618.9	6353.2	5482.9	Unité :	4
Masse sèche	589.4	5659.7	5229.2	ΔL Piéz. :	100 mm
Masse tare	17.1	430.5		Séquence :	CSK
w %	**5.17**	**13.26**	**4.85**	Temp.eau :	20 °C

DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Δt	Vol. eau	Gradient	Vitesse	k
min	cm^3	1/1	cm/s	cm/s
0	0	0.22		
4	44	0.23	1.1E-03	5.0E-03
6	66	0.23	1.1E-03	4.8E-03
8	87	0.23	1.1E-03	4.8E-03
15	163	0.23	1.1E-03	4.8E-03
17	185	0.23	1.1E-03	4.8E-03
19	207	0.23	1.1E-03	4.8E-03
21	229	0.23	1.1E-03	4.8E-03
23	250	0.23	1.1E-03	4.8E-03
28	305	0.23	1.1E-03	4.8E-03
30	327	0.23	1.1E-03	4.8E-03
33	359	0.23	1.1E-03	4.8E-03



Type de matériau : Sable graveleux, traces de silt.
Type de spécimen : Compacté

Remarques :
L'essai a été réalisé avec une eau commerciale de qualité potable.
Spécimen compacté à la teneur en eau de réception.

RÉSULTATS D'ESSAI		
Masse volum. sèche initiale :	1977	kg/m^3
Teneur en eau initiale :	4.9	%
Degré de saturation initial :	36	%
Coefficient de perméabilité :	4.8E-03	cm/s
Gradient hydraulique moyen :	0.23	1/1

Figure-A V-26 Essai de perméabilité des échantillons GRD de Granby

Maxxam

Le succès par la science®

Dossier Maxxam: B255789
Date du rapport: 2012/10/11

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568
Adresse du site: GARAGE MUNICIPAL
Votre # de commande: L-003-17000

HAP PAR GCMS (SOL)

Identification Maxxam						846513	846514		
Date d'échantillonnage						2012/10/01	2012/10/01		
# Bordereau						E832991	E832991		
	UNITÉS	A	B	C	D	1-A 6" D'EAU	2-A 10" D'EAU	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	-	5.6	5.2		
HAP									
Acénaphtène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	ND	0.1	1064919
Acénaphtylène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	ND	0.1	1064919
Anthracène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	ND	0.1	1064919
Benzo(a)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.2	ND	0.1	1064919
Benzo(a)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.2	0.1	0.1	1064919
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	-	0.2	0.1	0.1	1064919
Benzo(j)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	-	ND	ND	0.1	1064919
Benzo(k)fluoranthène	mg/kg	0.1	1	10	-	ND	ND	0.1	1064919
Benzo(c)phénanthrène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	0.1	1064919
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg	0.1	1	10	18	0.1	ND	0.1	1064919
Chrysène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.2	0.2	0.1	1064919
Dibenz(a,h)anthracène	mg/kg	0.1	1	10	82	ND	ND	0.1	1064919
Dibenzo(a,i)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	ND	0.1	1064919
Dibenzo(a,h)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	ND	0.1	1064919
Dibenzo(a,l)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	ND	0.1	1064919
7,12-Diméthylbenzanthracène	mg/kg	0.1	1	10	34	ND	ND	0.1	1064919
Fluoranthène	mg/kg	0.1	10	100	100	0.6	0.3	0.1	1064919
Fluorène	mg/kg	0.1	10	100	100	ND	ND	0.1	1064919
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg	0.1	1	10	34	0.1	ND	0.1	1064919
3-Méthylcholanthrène	mg/kg	0.1	1	10	160	ND	ND	0.1	1064919
Naphtalène	mg/kg	0.1	5	50	68	ND	ND	0.1	1064919
Phénanthrène	mg/kg	0.1	5	50	68	0.2	0.1	0.1	1064919
Pyrène	mg/kg	0.1	10	100	100	0.4	0.3	0.1	1064919
2-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	0.1	1064919
1-Méthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	0.1	1064919
1,3-Diméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	0.1	1064919
2,3,5-Triméthylnaphtalène	mg/kg	0.1	1	10	68	ND	ND	0.1	1064919
Récupération des surrogates (%)									
D10-Anthracène	%	-	-	-	-	89	88		1064919

ND = Inférieur à la limite de détection rapportée
LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité

Figure-A V-27 Échantillons GRL de Granby

Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B255789
Date du rapport: 2012/10/11

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568
Adresse du site: GARAGE MUNICIPAL
Votre # de commande: L-003-17000

HYDROCARBURES PAR GCFID (SOL)

Identification Maxxam						S46513	S46514		
Date d'échantillonnage						2012/10/01	2012/10/01		
# Bordereau						E832991	E832991		
	UNITÉS	A	B	C	D	1-A 6" D'EAU	2-A 10" D'EAU	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	-	5.6	5.2		
HYDRO. PÉTROLIERS TOTAUX									
Hydrocarbures Pétroliers (C10-C50)	mg/kg	300	700	3500	10000	380	430	100	1064918
Récupération des Surrogates (%)									
1-Chlorooctadécane	%	-	-	-	-	82	85		1064918

LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité

Figure-A V-28 Échantillons GRL de Granby

Maxxam

Le succès par la science

Dossier Maxxam: B255789
Date du rapport: 2012/10/11

Les Services exp Inc.
Votre # du projet: GRAV-18568
Adresse du site: GARAGE MUNICIPAL
Votre # de commande: L-003-17000

MÉTAUX EXTRACTIBLES TOTAUX (SOL)

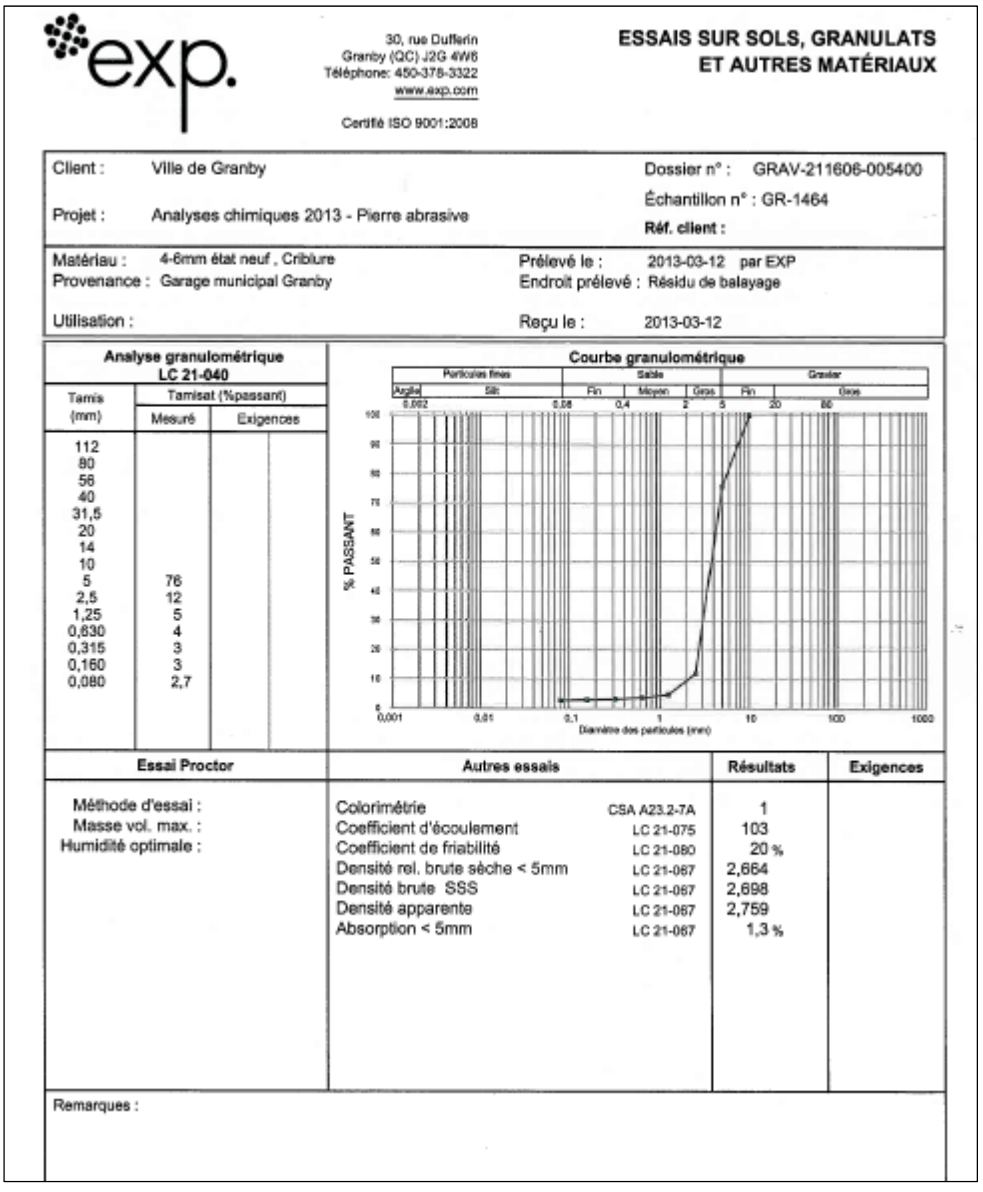
Identification Maxxam						S46513	S46514		
Date d'échantillonnage						2012/10/01	2012/10/01		
# Bordereau						E832991	E832991		
	UNITÉS	A	B	C	D	1-A 6" D'EAU	2-A 10" D'EAU	LDR	Lot CQ
% Humidité	%	-	-	-	-	5.6	5.2		
MÉTAUX									
Mercure (Hg)	mg/kg	0.2	2	10	50	ND	ND	0.02	1065201
Argent (Ag)	mg/kg	2	20	40	200	ND	ND	0.5	1065201
Arsenic (As)	mg/kg	6	30	50	250	ND	ND	5	1065201
Baryum (Ba)	mg/kg	200	500	2000	10000	25	33	5	1065201
Cadmium (Cd)	mg/kg	1.5	5	20	100	ND	ND	0.5	1065201
Cobalt (Co)	mg/kg	15	50	300	1500	3	3	2	1065201
Chrome (Cr)	mg/kg	85	250	800	4000	16	19	2	1065201
Cuivre (Cu)	mg/kg	40	100	500	2500	10	8	2	1065201
Etain (Sn)	mg/kg	5	50	300	1500	ND	ND	4	1065201
Manganèse (Mn)	mg/kg	770	1000	2200	11000	340	340	2	1065201
Molybdène (Mo)	mg/kg	2	10	40	200	ND	ND	1	1065201
Nickel (Ni)	mg/kg	50	100	500	2500	9	9	1	1065201
Plomb (Pb)	mg/kg	50	500	1000	5000	ND	ND	5	1065201
Sélénium (Se)	mg/kg	1	3	10	50	ND	ND	1	1065201
Zinc (Zn)	mg/kg	110	500	1500	7500	38	35	10	1065201

ND = Inférieur à la limite de détection rapportée
LDR = Limite de détection rapportée
Lot CQ = Lot Contrôle Qualité

Figure-A V-29 Échantillons GRL de Granby

ANNEXE VI

RÉSULTATS DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION PHYSIQUE 2



exp.

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client : Ville de Granby
Dossier n° : GRAV-211606-005400
Échantillon n° : GR-1464
Projet : Analyses chimiques 2013 - Pierre abrasive
Réf. client :

Matériau : 4-6mm état neuf , Cribiure
Prélevé le : 2013-03-12 par EXP
Provenance : Garage municipal Granby
Endroit prélevé : Résidu de balayage
Utilisation :
Reçu le : 2013-03-12

Analyse granulométrique LC 21-040

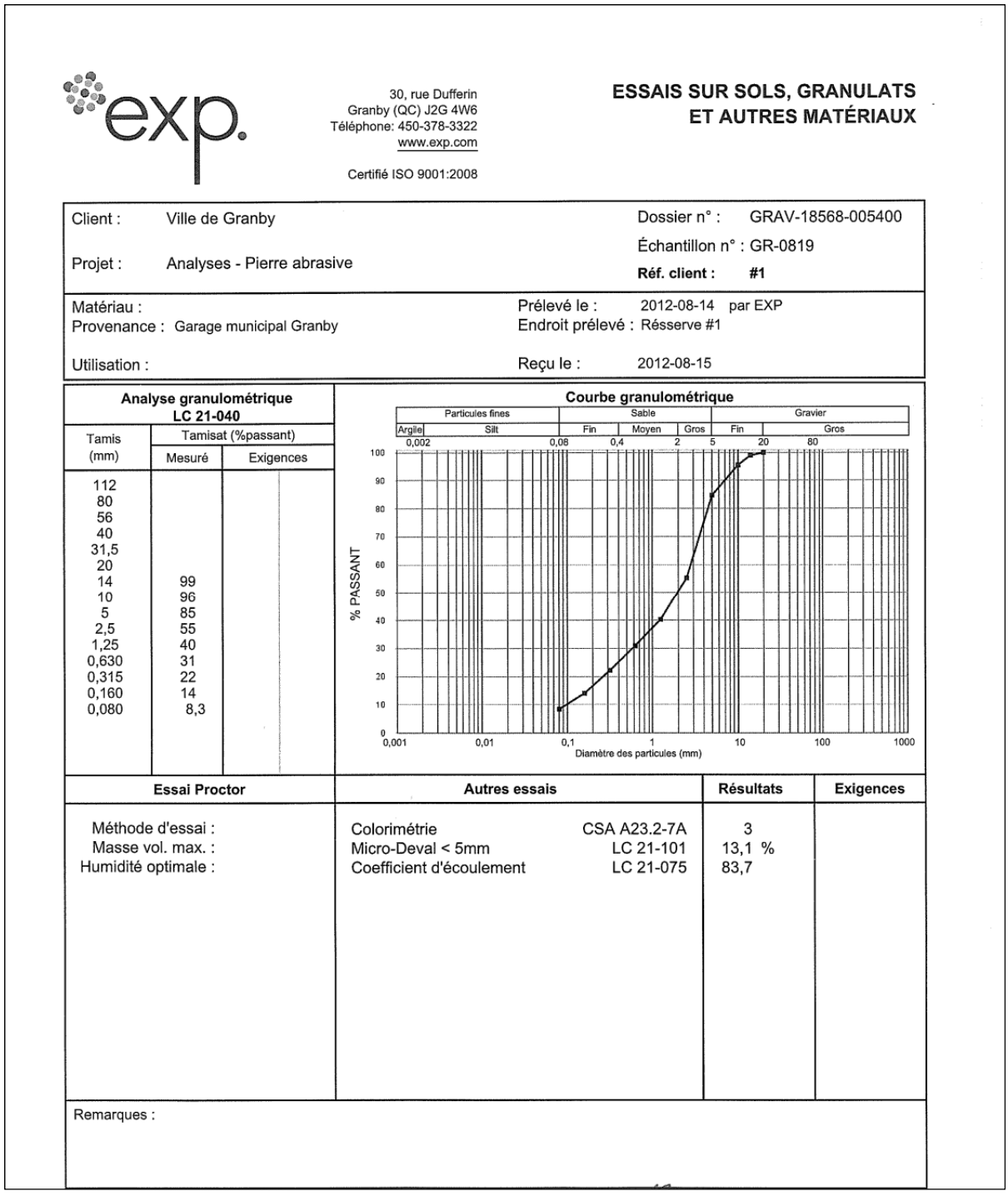
Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14		
10		
5	76	
2,5	12	
1,25	5	
0,630	4	
0,315	3	
0,160	3	
0,080	2,7	

Courbe granulométrique

Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	1	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	103	
Humidité optimale :		Coefficient de friabilité	LC 21-080	20 %	
		Densité rel. brute sèche < 5mm	LC 21-067	2,664	
		Densité brute SSS	LC 21-067	2,698	
		Densité apparente	LC 21-067	2,759	
		Absorption < 5mm	LC 21-067	1,3 %	

Remarques :

Figure-A VI-1 Échantillons GRN de Granby



exp.

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client : Ville de Granby
Dossier n° : GRAV-18568-005400
Échantillon n° : GR-0819
Projet : Analyses - Pierre abrasive
Réf. client : #1

Matériau :
Provenance : Garage municipal Granby
Prélevé le : 2012-08-14 par EXP
Endroit prélevé : Résserve #1
Utilisation :
Reçu le : 2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

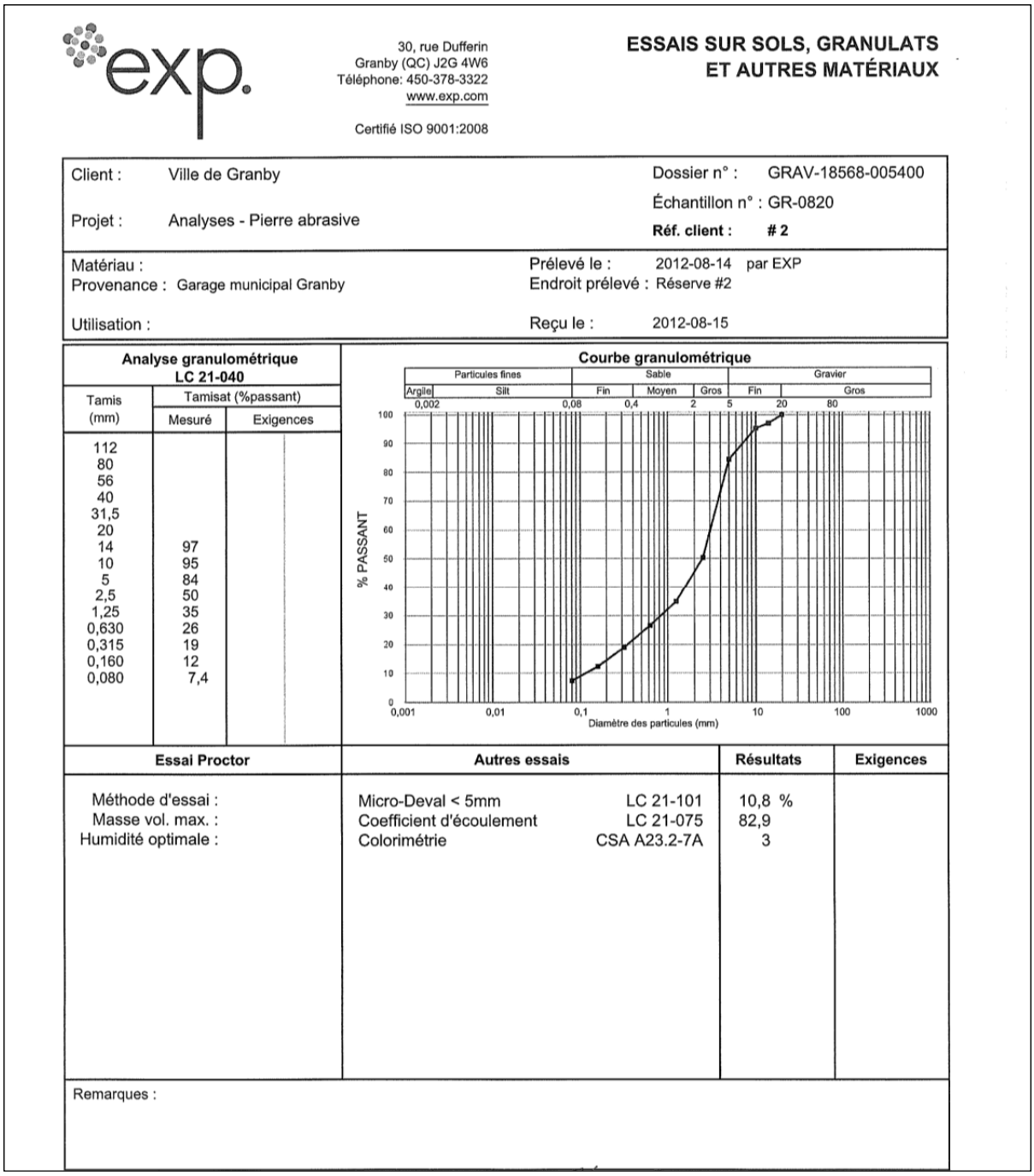
Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14	99	
10	96	
5	85	
2,5	55	
1,25	40	
0,630	31	
0,315	22	
0,160	14	
0,080	8,3	

Courbe granulométrique

Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	
Masse vol. max. :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	13,1 %	
Humidité optimale :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	83,7	

Remarques :

Figure-A VI-2 Échantillons GRD de Granby



exp.

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client : Ville de Granby
Dossier n° : GRAV-18568-005400
Échantillon n° : GR-0820
Projet : Analyses - Pierre abrasive
Réf. client : # 2

Matériau :
Provenance : Garage municipal Granby
Prélevé le : 2012-08-14 par EXP
Endroit prélevé : Réserve #2
Utilisation :
Reçu le : 2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

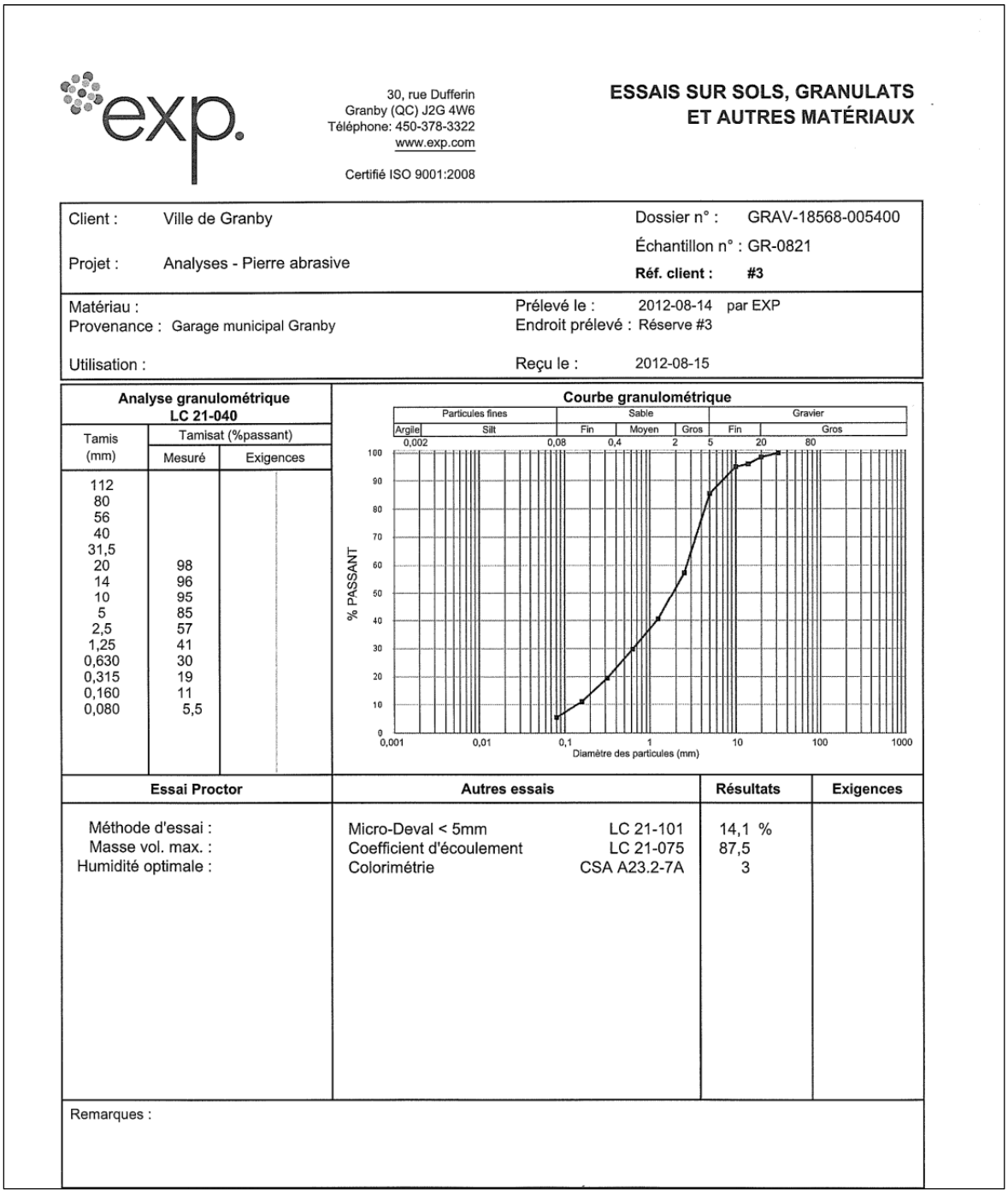
Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14	97	
10	95	
5	84	
2,5	50	
1,25	35	
0,630	26	
0,315	19	
0,160	12	
0,080	7,4	

Courbe granulométrique

Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	10,8 %	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	82,9	
Humidité optimale :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	

Remarques :

Figure-A VI-3 Échantillons GRD de Granby



exp.

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client : Ville de Granby
Projet : Analyses - Pierre abrasive

Dossier n° : GRAV-18568-005400
Échantillon n° : GR-0821
Réf. client : #3

Matériau :
Provenance : Garage municipal Granby
Utilisation :

Prélevé le : 2012-08-14 par EXP
Endroit prélevé : Réserve #3
Reçu le : 2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20	98	
14	96	
10	95	
5	85	
2,5	57	
1,25	41	
0,630	30	
0,315	19	
0,160	11	
0,080	5,5	

Courbe granulométrique

Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	14,1 %	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	87,5	
Humidité optimale :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	

Remarques :

Figure-A VI-4 Échantillons GRD de Granby

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

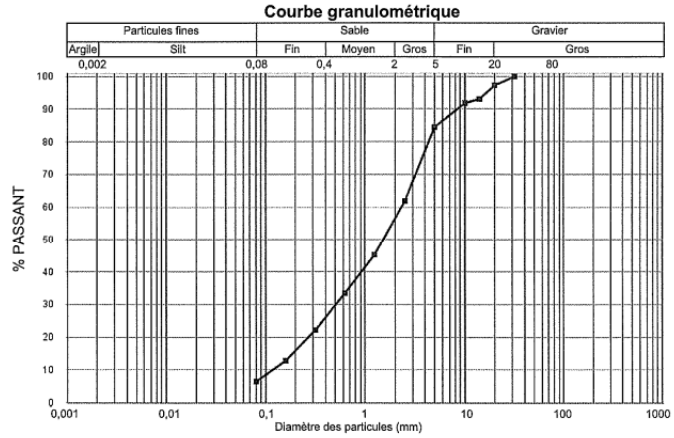
Client : Ville de Granby
Dossier n° : GRAV-18568-005400
Projet : Analyses - Pierre abrasive
Échantillon n° : GR-0822
Réf. client : #4

Matériau :
Provenance : Garage municipal Granby
Prélevé le : 2012-08-14 par EXP
Endroit prélevé : Réserve #4
Utilisation :
Reçu le : 2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20	97	
14	93	
10	92	
5	84	
2,5	62	
1,25	45	
0,630	33	
0,315	22	
0,160	13	
0,080	6,4	

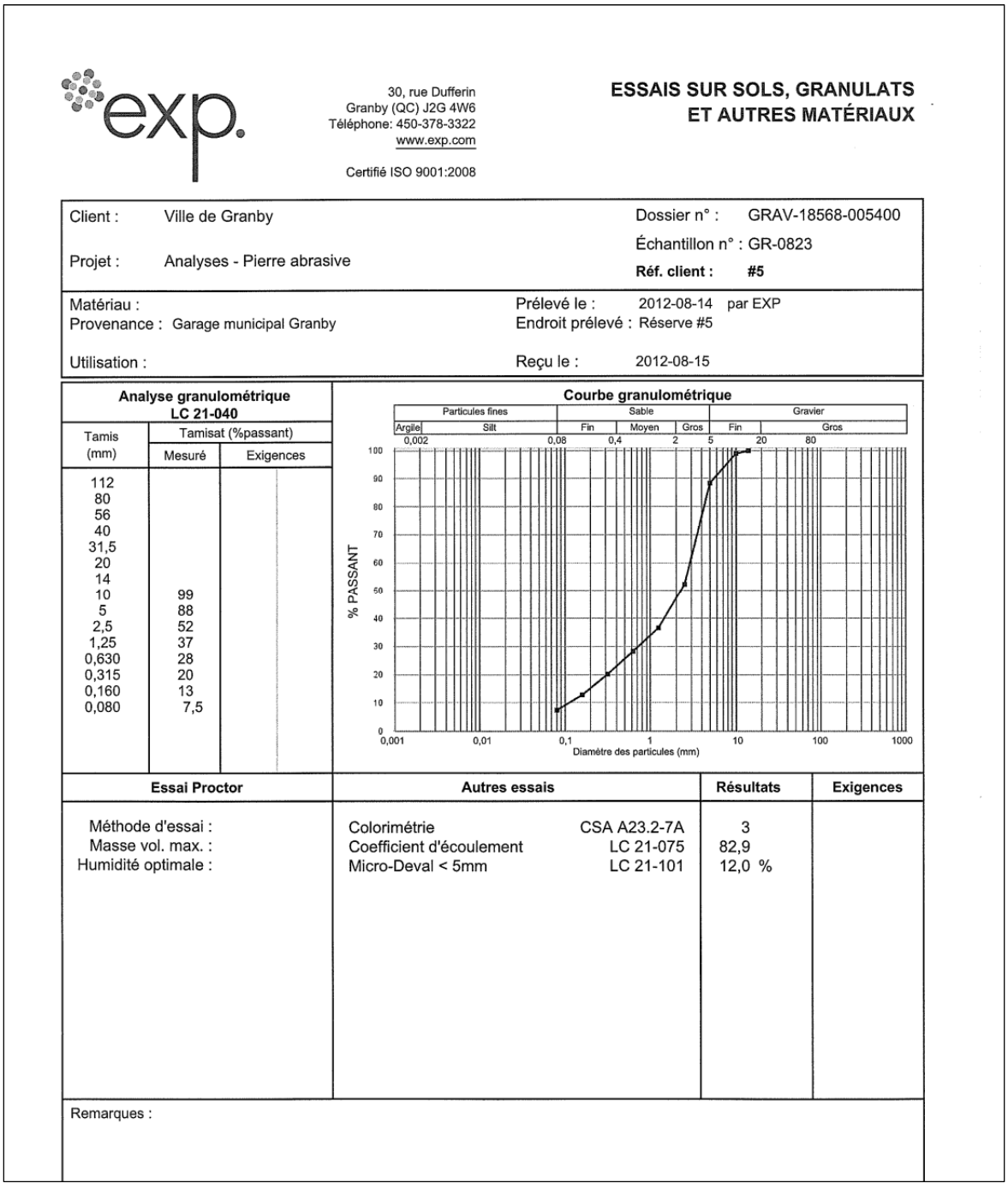
Courbe granulométrique



Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	11,5 %	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	83,0	
Humidité optimale :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	

Remarques :

Figure-A VI-5 Échantillons GRD de Granby



exp.

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client : Ville de Granby
Dossier n° : GRAV-18568-005400
Échantillon n° : GR-0823
Projet : Analyses - Pierre abrasive
Réf. client : #5

Matériau :
Provenance : Garage municipal Granby
Prélevé le : 2012-08-14 par EXP
Endroit prélevé : Réserve #5
Utilisation :
Reçu le : 2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

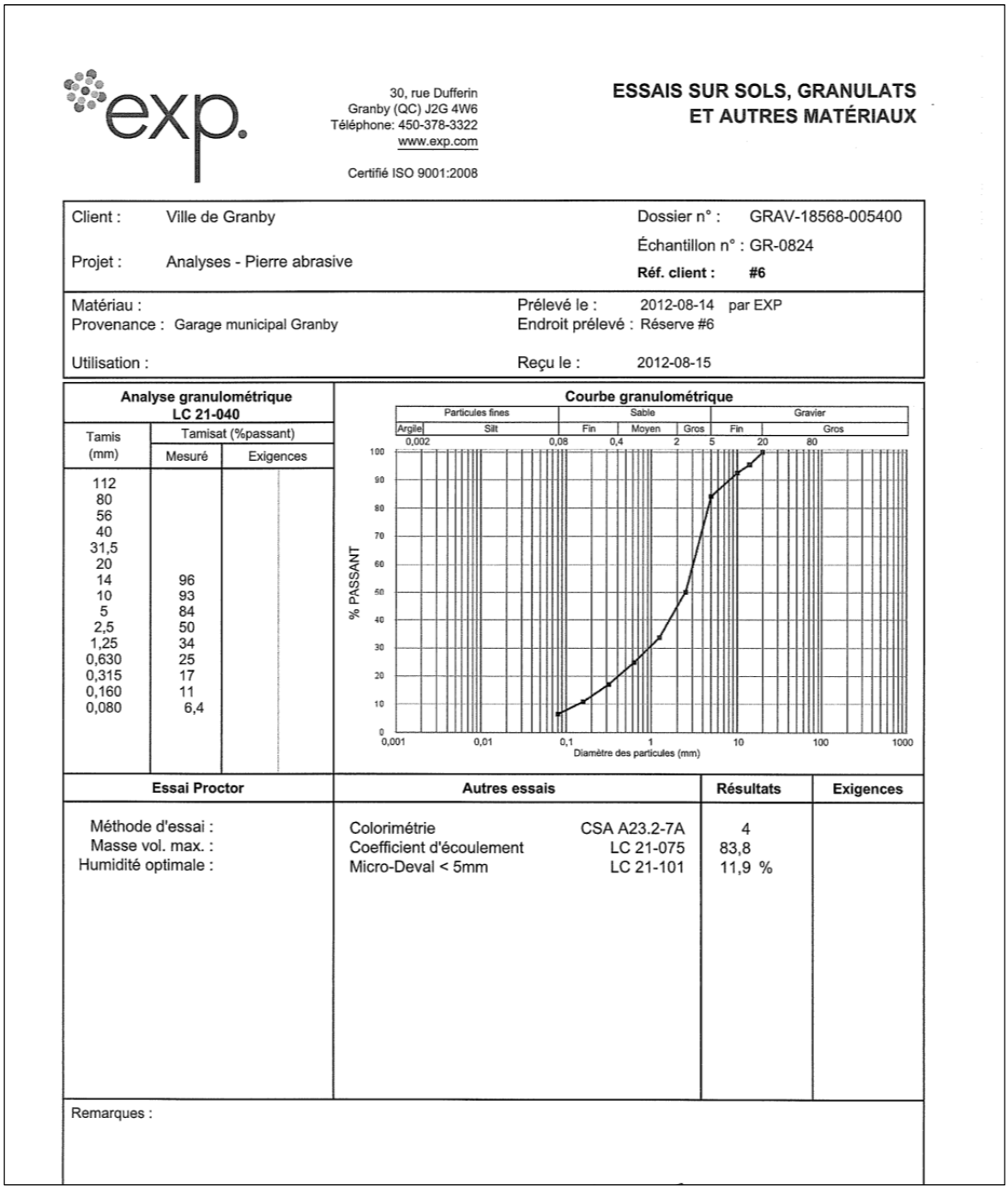
Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14		
10	99	
5	88	
2,5	52	
1,25	37	
0,630	28	
0,315	20	
0,160	13	
0,080	7,5	

Courbe granulométrique

Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	82,9	
Humidité optimale :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	12,0 %	

Remarques :

Figure-A VI-6 Échantillons GRD de Granby



exp.

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client : Ville de Granby
Dossier n° : GRAV-18568-005400
Projet : Analyses - Pierre abrasive
Échantillon n° : GR-0824
Réf. client : #6

Matériau :
Provenance : Garage municipal Granby
Prélevé le : 2012-08-14 par EXP
Endroit prélevé : Réserve #6
Utilisation :
Reçu le : 2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

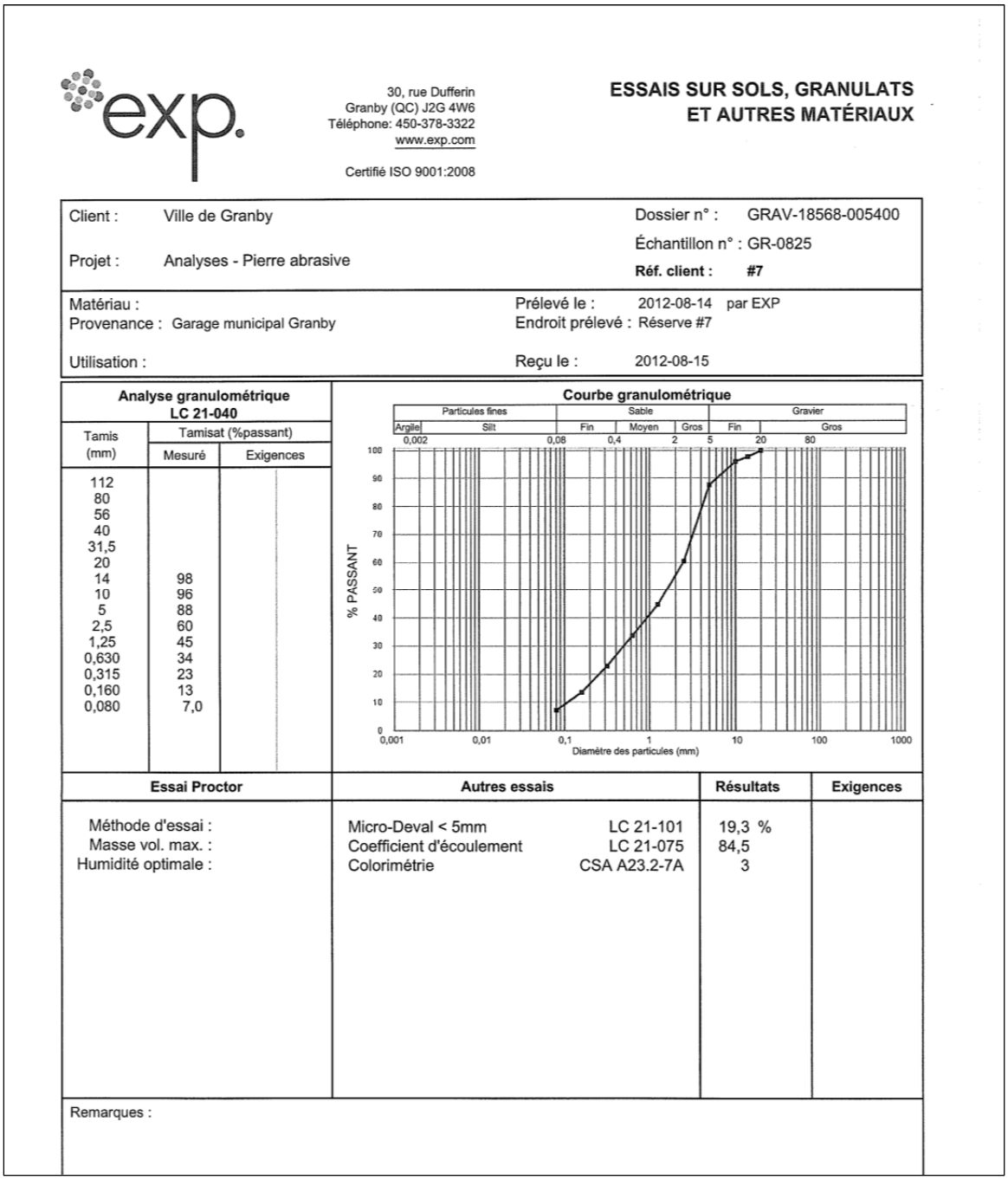
Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14	96	
10	93	
5	84	
2,5	50	
1,25	34	
0,630	25	
0,315	17	
0,160	11	
0,080	6,4	

Courbe granulométrique

Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	4	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	83,8	
Humidité optimale :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	11,9 %	

Remarques :

Figure-A VI-7 Échantillons GRD de Granby



exp.

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client : Ville de Granby
Dossier n° : GRAV-18568-005400
Échantillon n° : GR-0825
Projet : Analyses - Pierre abrasive
Réf. client : #7

Matériau :
Provenance : Garage municipal Granby
Prélevé le : 2012-08-14 par EXP
Endroit prélevé : Réserve #7
Utilisation :
Reçu le : 2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

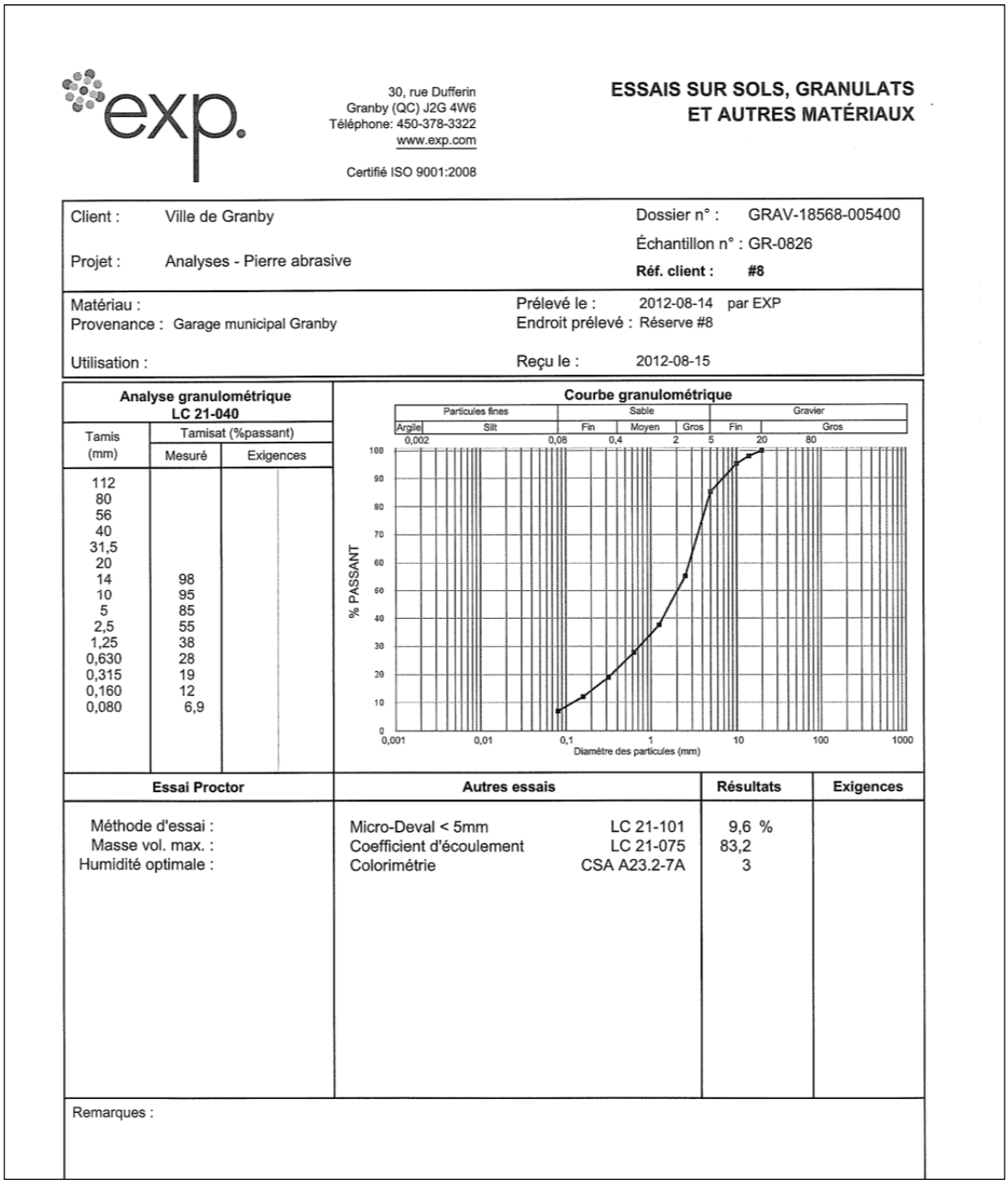
Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14	98	
10	96	
5	88	
2,5	60	
1,25	45	
0,630	34	
0,315	23	
0,160	13	
0,080	7,0	

Courbe granulométrique

Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	19,3 %	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	84,5	
Humidité optimale :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	

Remarques :

Figure-A VI-8 Échantillons GRD de Granby



exp.

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client : Ville de Granby
Projet : Analyses - Pierre abrasive

Dossier n° : GRAV-18568-005400
Échantillon n° : GR-0826
Réf. client : #8

Matériau :
Provenance : Garage municipal Granby
Utilisation :

Prélevé le : 2012-08-14 par EXP
Endroit prélevé : Réserve #8
Reçu le : 2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

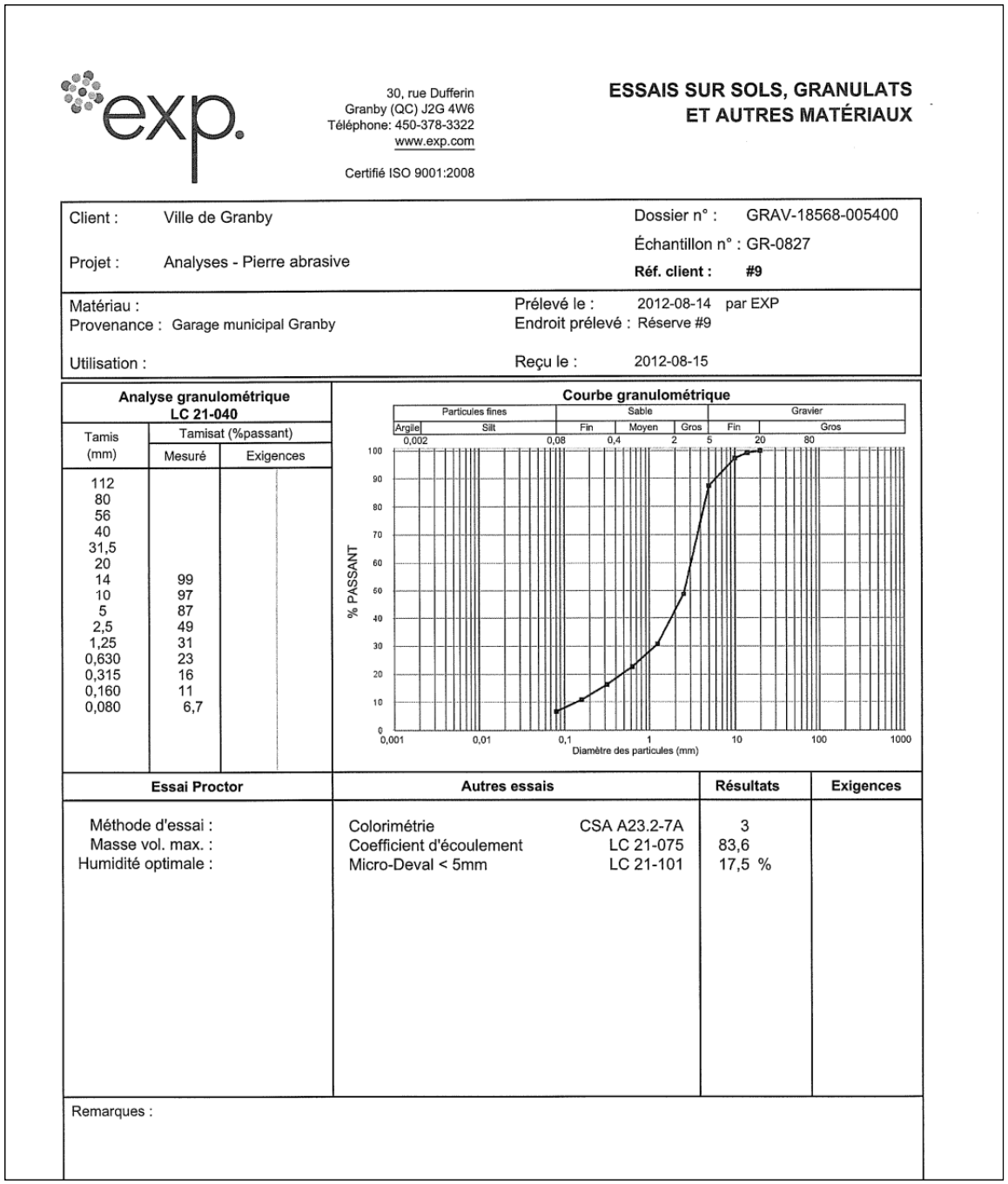
Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14	98	
10	95	
5	85	
2,5	55	
1,25	38	
0,630	28	
0,315	19	
0,160	12	
0,080	6,9	

Courbe granulométrique

Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	9,6 %	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	83,2	
Humidité optimale :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	

Remarques :

Figure-A VI-9 Échantillons GRD de Granby



exp.

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client : Ville de Granby
Projet : Analyses - Pierre abrasive

Dossier n° : GRAV-18568-005400
Échantillon n° : GR-0827
Réf. client : #9

Matériau :
Provenance : Garage municipal Granby
Utilisation :

Prélevé le : 2012-08-14 par EXP
Endroit prélevé : Réserve #9
Reçu le : 2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14	99	
10	97	
5	87	
2,5	49	
1,25	31	
0,630	23	
0,315	16	
0,160	11	
0,080	6,7	

Courbe granulométrique

Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	83,6	
Humidité optimale :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	17,5 %	

Remarques :

Figure-A VI-10 Échantillons GRD de Granby

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

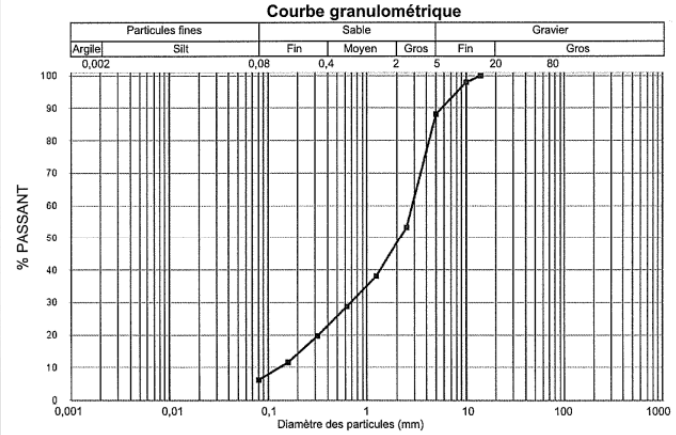
Client : Ville de Granby
Dossier n° : GRAV-18568-005400
Échantillon n° : GR-0828
Projet : Analyses - Pierre abrasive
Réf. client : #10

Matériau :
Provenance : Garage municipal Granby
Prélevé le : 2012-08-15 par EXP
Endroit prélevé : Réserve #10
Utilisation :
Reçu le : 2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14		
10	98	
5	88	
2,5	53	
1,25	38	
0,630	29	
0,315	20	
0,160	12	
0,080	6,2	

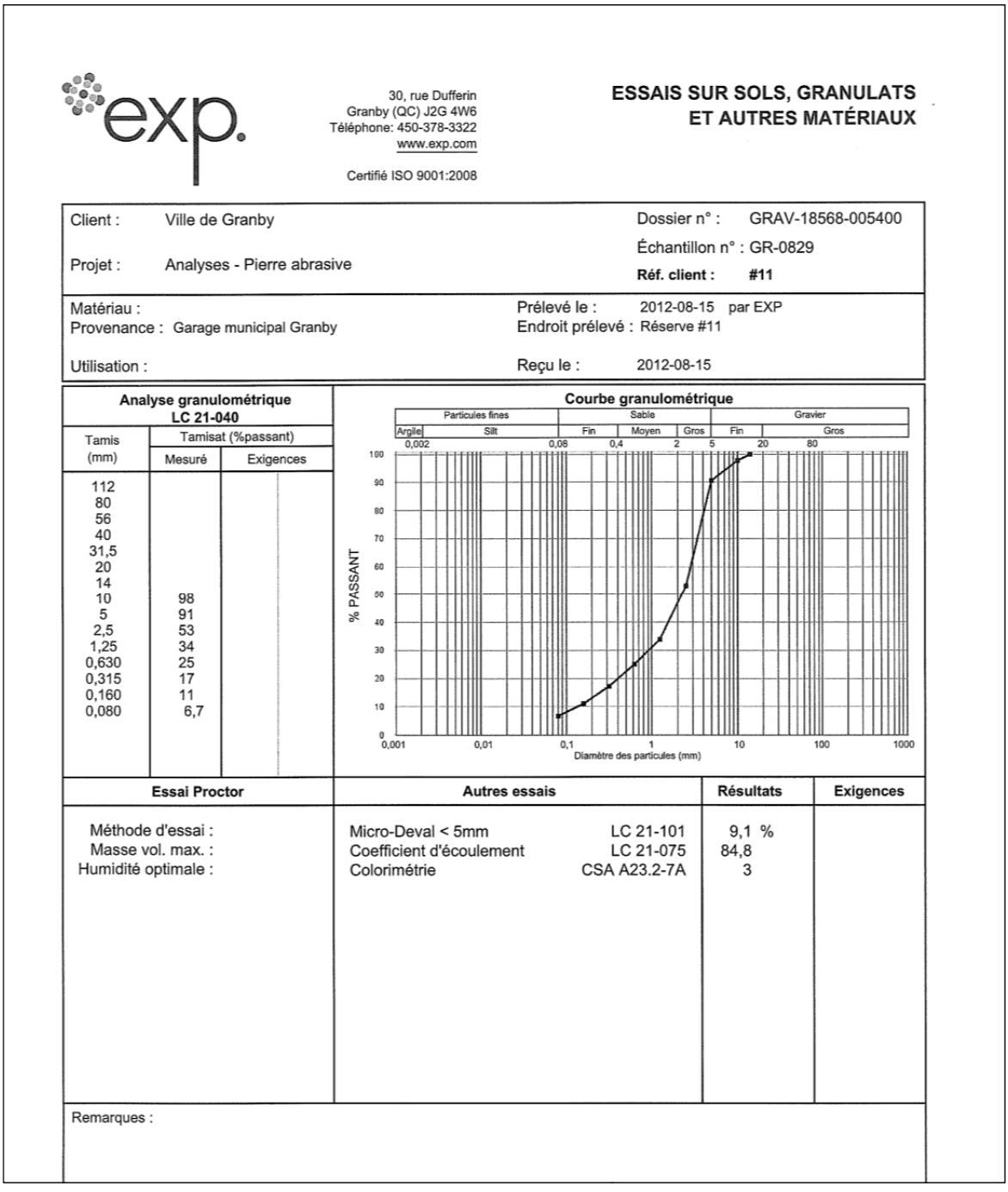
Courbe granulométrique



Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	13,0 %	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	79,1	
Humidité optimale :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	

Remarques :

Figure-A VI-11 Échantillons GRD de Granby



exp.

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client : Ville de Granby
Projet : Analyses - Pierre abrasive

Dossier n° : GRAV-18568-005400
Échantillon n° : GR-0829
Réf. client : #11

Matériau :
Provenance : Garage municipal Granby
Utilisation :

Prélevé le : 2012-08-15 par EXP
Endroit prélevé : Réserve #11
Reçu le : 2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14		
10	98	
5	91	
2,5	53	
1,25	34	
0,630	25	
0,315	17	
0,160	11	
0,080	6,7	

Courbe granulométrique

Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	9,1 %	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	84,8	
Humidité optimale :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	

Remarques :

Figure-A VI-12 Échantillons GRD de Granby

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

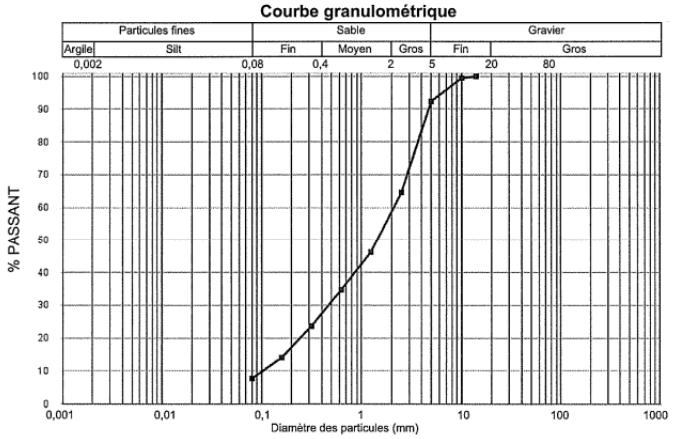
ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client :	Ville de Granby	Dossier n° :	GRAV-18568-005400
Projet :	Analyses - Pierre abrasive	Échantillon n° :	GR-0830
		Réf. client :	**#12**
Matériau :		Prélevé le :	2012-08-14 par EXP
Provenance :	Garage municipal Granby	Endroit prélevé :	Réserve #12
Utilisation :		Reçu le :	2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14		
10	99	
5	92	
2,5	65	
1,25	46	
0,630	35	
0,315	24	
0,160	14	
0,080	7,6	

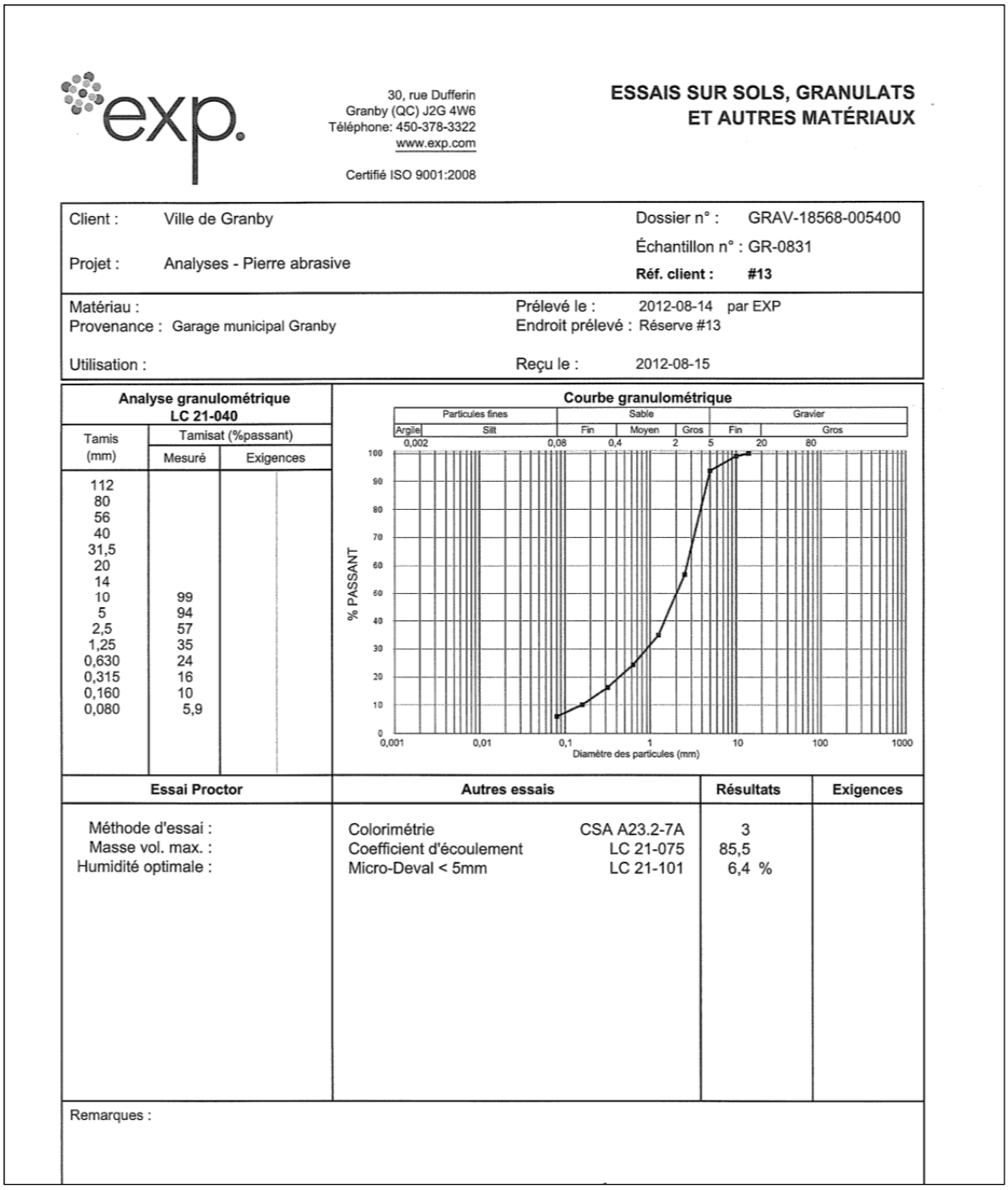
Courbe granulométrique



Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	13,7 %	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	79,0	
Humidité optimale :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	

Remarques :

Figure-A VI-13 Échantillons GRD de Granby



exp.

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client : Ville de Granby
Dossier n° : GRAV-18568-005400
Projet : Analyses - Pierre abrasive
Échantillon n° : GR-0831
Réf. client : #13

Matériau :
Provenance : Garage municipal Granby
Prélevé le : 2012-08-14 par EXP
Endroit prélevé : Réserve #13
Utilisation :
Reçu le : 2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

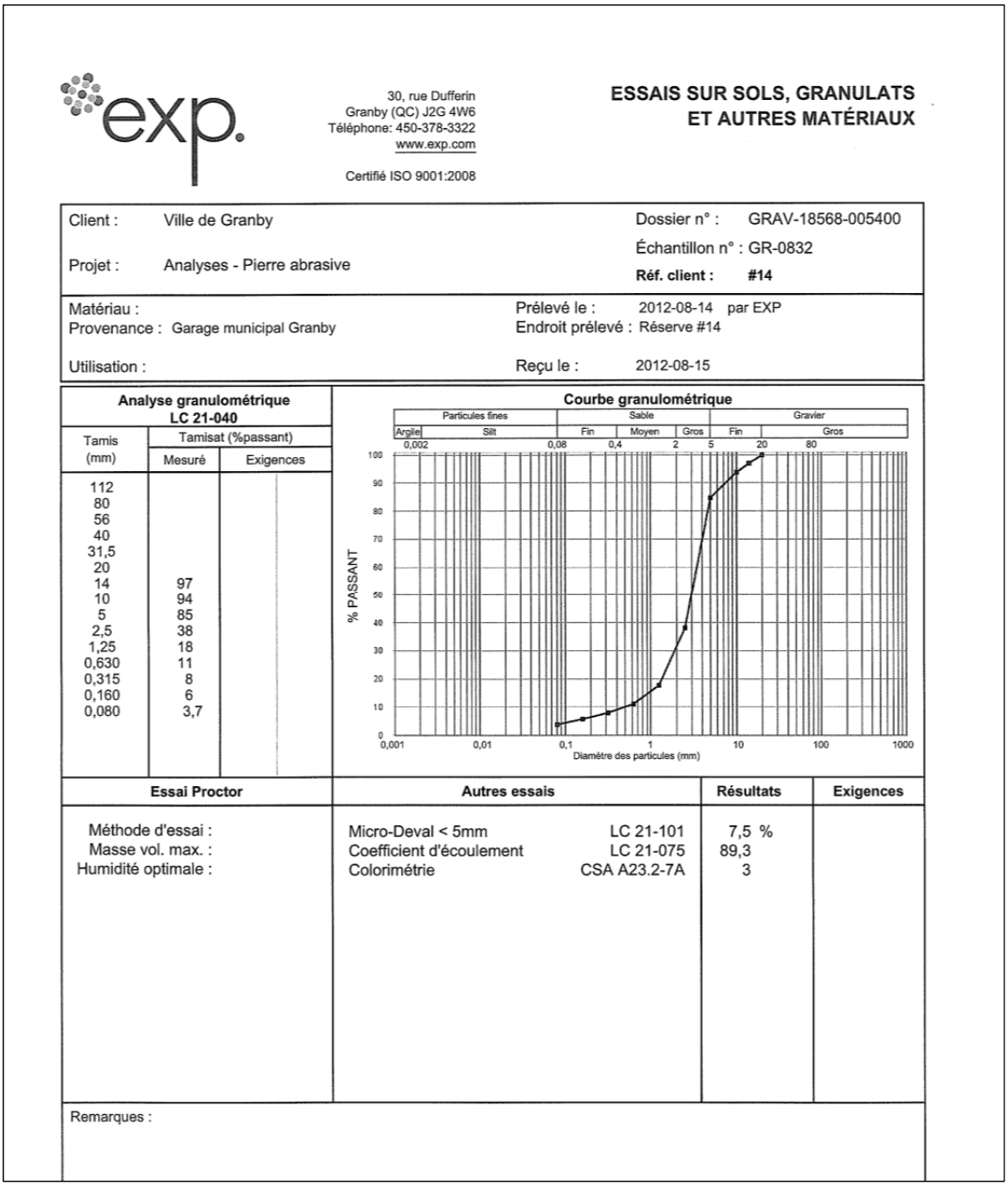
Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14		
10	99	
5	94	
2,5	57	
1,25	35	
0,630	24	
0,315	16	
0,160	10	
0,080	5,9	

Courbe granulométrique

Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	85,5	
Humidité optimale :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	6,4 %	

Remarques :

Figure-A VI-14 Échantillons GRD de Granby



30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client : Ville de Granby
Dossier n° : GRAV-18568-005400
Projet : Analyses - Pierre abrasive
Échantillon n° : GR-0832
Réf. client : #14

Matériau :
Provenance : Garage municipal Granby
Prélevé le : 2012-08-14 par EXP
Endroit prélevé : Réserve #14
Utilisation :
Reçu le : 2012-08-15

Analyse granulométrique LC 21-040

Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14	97	
10	94	
5	85	
2,5	38	
1,25	18	
0,630	11	
0,315	8	
0,160	6	
0,080	3,7	

Courbe granulométrique

Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	7,5 %	
Masse vol. max. :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	89,3	
Humidité optimale :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	

Remarques :

Figure-A VI-15 Échantillons GRD de Granby

30, rue Dufferin
Granby (QC) J2G 4W6
Téléphone: 450-378-3322
www.exp.com

Certifié ISO 9001:2008

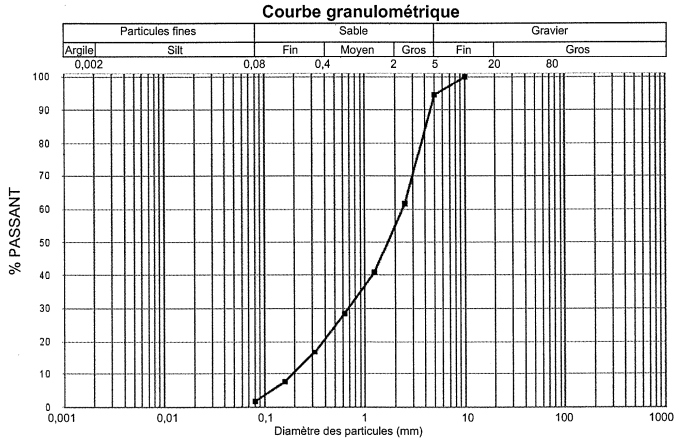
ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES MATÉRIAUX

Client :	Ville de Granby	Dossier n° :	GRAV-18568-005400
		Échantillon n° :	GR-1133
Projet :	Analyses - Pierre abrasive	**Réf. client :**	**Après lavage**
Matériau :		Prélevé le :	2012-11-19 par EXP
Provenance :		Endroit prélevé :	Garage municipal après lavage
Utilisation :		Reçu le :	2012-11-19

Analyse granulométrique LC 21-040

Tamis (mm)	Tamisat (%passant) Mesuré	Exigences
112		
80		
56		
40		
31,5		
20		
14		
10		
5	94	
2,5	62	
1,25	41	
0,630	28	
0,315	17	
0,160	8	
0,080	1,7	

Courbe granulométrique



Essai Proctor		Autres essais		Résultats	Exigences
Méthode d'essai :		Micro-Deval < 5mm	LC 21-101	14 %	
Masse vol. max. :		Colorimétrie	CSA A23.2-7A	3	
Humidité optimale :		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	89	

Remarques :

Figure-A VI-16 Échantillons GRL de Granby

Université du Québec
École de technologie supérieure
Département de génie de la construction
1100, rue Notre-Dame Ouest, Campus Paul-Au-sud, Montréal
(514) 396-8660 Télécopieur : 514 396-8660
http://www.etsmtl.ca

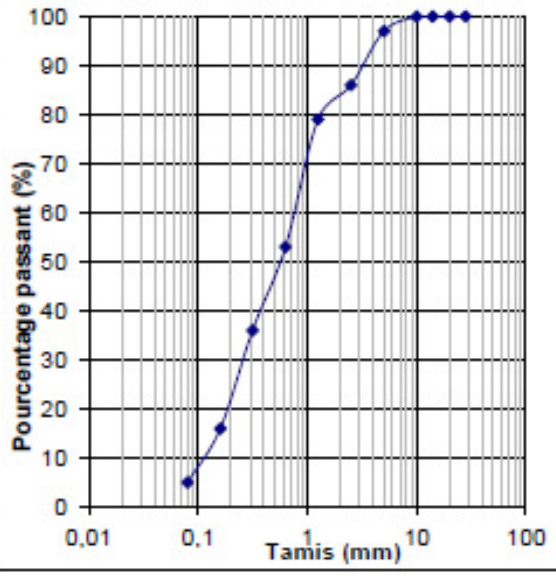
Essais sur sols et granulats

Projet :	Abrasifs Gatineau MTQ- DT	Dossier No:	
Client :	Gatineau	Échantillon No	A1 non lavé
		Normes :	BNQ - 2560 – 040
		Date essai	20/08/2013
Matériaux Abrasif Provenance : Gatineau		Prélevé le	05/06/2013
Utilisation: produit de Balayage printemps 2013		Endroit prélevé:	Site de lavage de Bromont

Analyse Granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (%) Mesuré	Exigences
28	100	
20	100	
14	100	
10	100	
5	97	
2.50	86	
1.250	79	
0.630	53	
0.315	36	
0.160	16	
0.080	5	

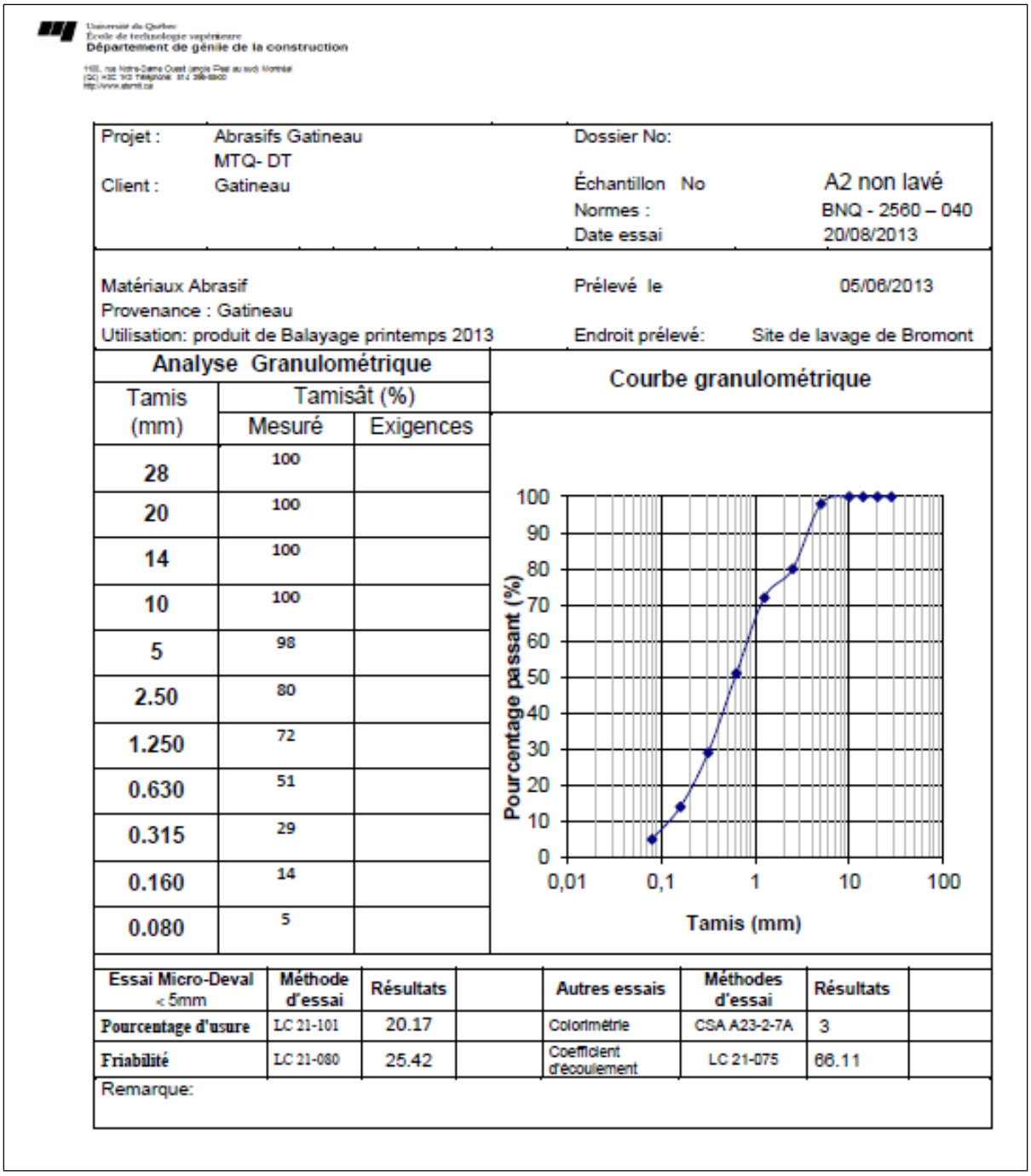
Courbe granulométrique



Essai Micro-Deval < 5mm	Méthode d'essai	Résultats	Exigences	Autres essais	Méthodes d'essai	Résultats	Exigences
Pourcentage d'usure	LC 21-101	17.12		Colorimétrie	CSA A23-2-7A	3	
Friabilité	LC 21-080	26.12		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	69.85	

Remarque:

Figure-A VI-17 Échantillons GTD de Gatineau



Université du Québec
École de technologie supérieure
Département de génie de la construction

Projet :	Abrasifs Gatineau MTQ- DT	Dossier No:	
Client :	Gatineau	Échantillon No	A2 non lavé
		Normes :	BNQ - 2560 – 040
		Date essai	20/08/2013
Matériaux Abrasif		Prélevé le	05/06/2013
Provenance : Gatineau			
Utilisation: produit de Balayage printemps 2013		Endroit prélevé:	Site de lavage de Bromont

Analyse Granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (%) Mesuré	Exigences
28	100	
20	100	
14	100	
10	100	
5	98	
2.50	80	
1.250	72	
0.630	51	
0.315	29	
0.160	14	
0.080	5	

Courbe granulométrique

Essai Micro-Deval <5mm	Méthode d'essai	Résultats		Autres essais	Méthodes d'essai	Résultats	
Pourcentage d'usure	LC 21-101	20.17		Colorimétrie	CSA A23-2-7A	3	
Friabilité	LC 21-080	25.42		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	66.11	

Remarque:

Figure-A VI-18 Échantillons GTD de Gatineau

Université du Québec
École de technologie supérieure
Département de génie de la construction

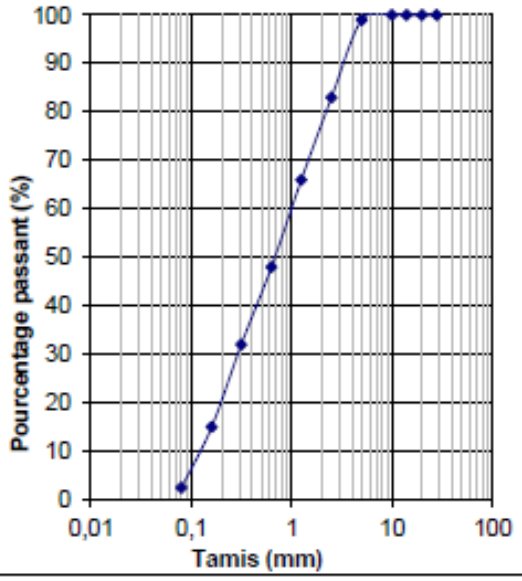
Essais sur sols et granulats

Projet :	Abrasifs Gatineau MTQ- DT	Dossier No:	
Client :	Gatineau	Échantillon No	B1 lavé
		Normes :	BNQ - 2560 – 040
		Date essai	20/08/2013
Matériaux Abrasif		Prélevé le	12/06/2013
Provenance : Gatineau			
Utilisation: produit de Balayage printemps 2013		Endroit prélevé:	Site de lavage de Bromont

Analyse Granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (%) Mesuré	Exigences
28	100	
20	100	
14	100	
10	100	
5	99	
2.50	83	
1.250	66	
0.630	48	
0.315	32	
0.160	15	
0.080	2.5	

Courbe granulométrique



Essai Micro-Deval < 5mm	Méthode d'essai	Résultats		Autres essais	Méthodes d'essai	Résultats	Exigences
Pourcentage d'usure	LC 21-101	18.32		Colorimétrie	CSA A23-2-7A	2	
Friabilité	LC 21-080	24.2		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	89.5	

Remarque:

Figure-A VI-19 Échantillons GTL de Gatineau

Université du Québec
École de technologie supérieure
Département de génie de la construction
1100, rue Notre-Dame Ouest (angle Peel au sud) Montréal
(Qc) H3C 1K3 Téléphone : 514 396-8600
http://www.etsmtl.ca

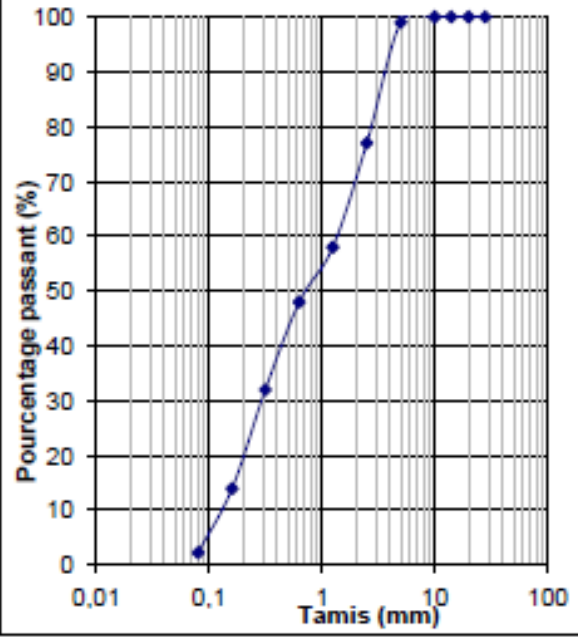
Essais sur sols et granulats

Projet :	Abrasifs Gatineau MTQ- DT	Dossier No:	
Client :	Gatineau	Échantillon No	B2 lavé
		Normes : 040	BNQ - 2560 –
		Date essai	20/08/2013
Matériaux Abrasif		Prélevé le	12/06/2013
Provenance : Gatineau			
Utilisation: produit de Balayage printemps 2013		Endroit prélevé:	Site de lavage de Bromont

Analyse Granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (%) Mesuré	Exigences
28	100	
20	100	
14	100	
10	100	
5	99	
2.50	77	
1.250	58	
0.630	48	
0.315	32	
0.160	14	
0.080	2.3	

Courbe granulométrique



Essai Micro-Deval < 5mm	Méthode d'essai	Résultats	Exigences	Autres essais	Méthodes d'essai	Résultats	Exigences
Pourcentage d'usure	LC 21-101	17.25		Colorimétrie	CSA A23-2-7A	2	
Friabilité	LC 21-080	25.74		Coefficient d'écoulement	LC 21-075	88.89	

Remarque:

Figure-A VI-20 Échantillons GTL de Gatineau

ANNEXE VII

DONNÉES DE RÈGLEMENTATION

Tableau-A VII-1 Classification des matériaux selon leur contamination
Tiré de MDDEP (2009)

Contaminants	Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4	Hors catégorie
Inorganiques (annexes 3 et 4)	< critère A	≥ critère A et < critère C, tout en respectant les valeurs maximales fixées concernant la lixiviation	< critère C, tout en respectant les valeurs maximales fixées concernant la lixiviation	Asphalte amiante mis sous forme d'enrobé lors de la scarification	< critère C, ne respectant les valeurs maximales fixées concernant la lixiviation ou ≥ critère C ou béton et asphalte contenant de l'amiante (sauf la catégorie 4)
Hydrocarbures pétroliers C_{10} à C_{50}	< 300 mg/kg	< 300 mg/kg	≥ 300 mg/kg et < 3 500 mg/kg et asphalte[20]		≥ 3 500 mg/kg ou béton taché ou assimilé à matière dangereuse
Organiques (volatils et semi-volatils)	< limite de quantification[21]	< limite de quantification[22]	< critère C pour ceux présents avec C_{10} à C_{50} et < limite de quantification pour les autres		≥ critère C pour ceux présents avec C_{10} à C_{50} ou ≥ limite de quantification pour les autres

Tableau-A VII-2 Utilisation en fonction des catégories de matériaux
Tiré de MDDEP (2009)

Utilisations	Catégories de matériaux			
	1	2	3	4
Construction sur un terrain à vocation résidentielle ou agricole, un établissement d'enseignement primaire ou secondaire, un centre de la petite enfance ou une garderie	oui			
Paillis, enrochement, aménagement paysager – brique, croûtes et retailles de la pierre de taille seulement	oui			
Remblayage d'une excavation lors de démantèlement	oui	*		
Restauration de carrière et sablière à partir de résidus du secteur de la pierre de taille	oui	oui		
Construction sur un terrain à vocation institutionnelle, commerciale et industrielle incluant les terrains municipaux	oui	oui	*	
Aménagement récréotouristique (piste cyclable, parc)	oui	oui	*	
Chemin d'accès[25], buttes antibruit et écran visuel	oui	oui	*	
Construction d'un dépôt à neige	oui	oui	*	
Matériel de recouvrement final de LEDCD, LES ou LET[26]	oui	oui	*	
Fabrication de béton[27]	oui	oui		
Enrobés à chaud[28]	oui	oui	oui	
Enrobés à froid	oui	oui	oui	
Stationnement et aire de stockage sur un terrain à vocation résidentielle ou agricole, un établissement d'enseignement primaire ou secondaire, un centre de la petite enfance ou une garderie[29]	oui	oui	oui	
Stationnement, aire de stockage sur un terrain à vocation institutionnelle, commerciale et industrielle incluant les terrains municipaux	oui	oui	oui	
Matériel de recouvrement journalier de LET[30]	oui	oui	oui	

Tableau-A VII-3 Valeurs maximales en regard des essais de lixiviation
Tiré de MDDEP (2009)

Paramètre	Valeur maximale – lixiviation pour l'évaluation de la mobilité des espèces inorganiques (TCLP, EPA 1311) et lixiviation à l'eau (CTEU 9) En mg/L	Valeur maximale – lixiviation pour simuler les pluies acides (SPLP, EPA 1312) En mg/L
Arsenic (As)	0,025	0,25
Baryum (Ba)	1	10
Bore (B)	5	50
Cadmium (Cd)	0,005	0,05
Chrome total (Cr)	0,05	0,5
Cuivre (Cu)	1	10
Cyanures (CN^-) – seulement lixiviation à l'eau	0,2	Non applicable
Fluorure (F)	1,5	15
Mercure (Hg)	0,001	0,01
Plomb (Pb)	0,01	0,1
Sélénium (Se)	0,01	0,1

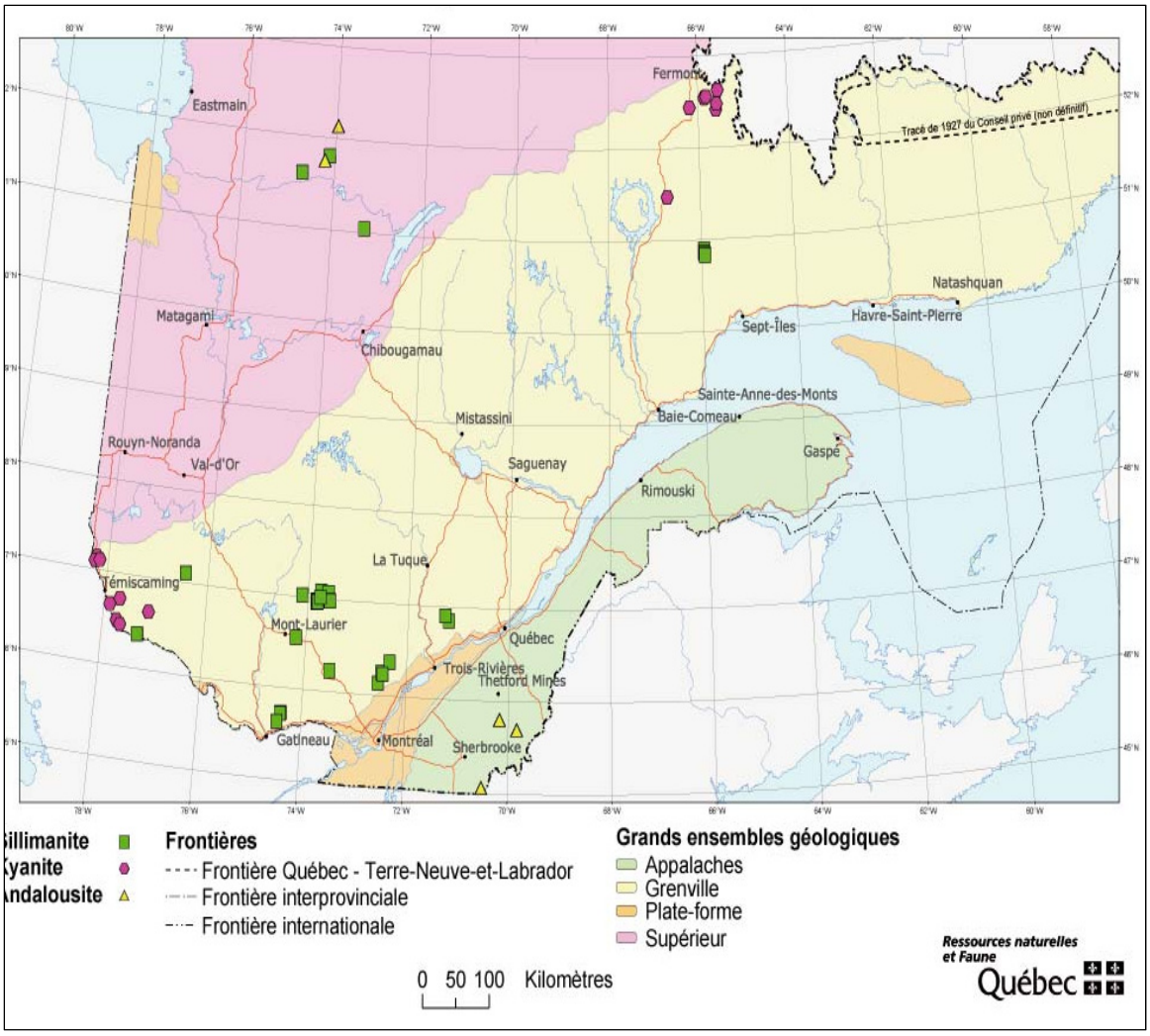


Figure-A VII-1 Carte géologique du Québec
Tirée de
http://www.mrn.gouv.qc.ca/mines/industrie/mineraux/images/carte_localisation_silli-g.jpg, consulté le 5 novembre 2012

ANNEXE VIII

ESSAIS D'ENROBÉS

Tableau-A VIII-1 Caractéristiques des enrobés selon la méthode Marshall
Tiré de Normes, ouvrages routiers, MTQ, tome VII Matériaux

Tableau 4201–1
Caractéristiques des enrobés à chaud formulés selon le principe de la méthode Marshall

Types d'enrobés	EB–20	EB–14	EB–10S	EB–10C	EB–5	CH–10	Méthodes d'essai
Usages	Couche de base	Couche unique, couche de surface ou couche de base	Couche de surface	Couche de surface ou couche de correction	Rapiéçage manuel ou couche de correction	Chape d'étanchéité	
Nombre minimal de classes granulaires distinctes à utiliser [1]	3	3	2	2	1	2	
Tamis	(% passant)						
28 mm	100						
20 mm	95–100	100					
14 mm	65–88	95–100	100	100		100	
10 mm	48–78	75–90	92–100	94–100	100	96–100	
5 mm	34–55	50–65	50–65	66–78	85–100	75–85	
2,5 mm	24–45	29–47	27–50	45–65	65–90	57–75	
1,25 mm	16–39	20–40	18–42	30–50	—	—	
630 µm	9–31	14–34	12–35	20–40	25–65	25–50	
315 µm	6–23	10–26	8–26	14–29	18–48	15–40	
160 µm	4–15	5–17	5–17	7–18	8–30	7–25	
80 µm	3,0–8,0	3,0–8,0	4,0–10,0	4,0–10,0	4,0–12,0	4,0–13,0	
Liant (% min.)	4,20	4,70	4,80	5,20	6,00	5,50	LC 26–100 LC 26–110
Fluage (mm)	2,0–4,0	2,0–4,0	2,0–4,0	2,0–4,0	2,0–4,5	2,0–4,0	LC 26–060
Stabilité (N)(min.)	9000	9000	9000	9000	7000	9000	LC 26–060
Vides (%) [2]	2,0–5,0	2,0–5,0	2,0–5,0	2,0–5,0	2,0–5,0	2,0–5,0	LC 26–320
VAM comblé (% max.)	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	LC 26–900
Compacité (% min.)	93,0	93,0	93,0	93,0	93,0	93,0	LC 26–320
Résistance à l'orniérage sur plaques de 100 mm à 52, 58 ou 60 °C (selon la classe de bitume) à 30 000 cycles (% max. de déformation) [3, 4, 5]	10,0	10,0	—	—	—	—	
Résistance à l'orniérage sur plaques de 50 mm à 52, 58 ou 60 °C (selon la classe de bitume) à 1000 cycles à 3000 cycles (% max. de déformation) [3, 4]	— —	— —	10,0 20,0	10,0 20,0	— —	— —	
Tenue à l'eau (% min.) [6]	70	70	70	70			LC 26–001

Tableau-A VIII-2 Résultats d'essais d'orniérage

Essai à l'orniereur d'un enrobé GB-20 avec 35 % d'abrasifs

Localisation sur plaque			Cycle à froid	*Nombre de Cycles (Cumulatif)*							
		Lect. initiale	1000	100	300	1000	3000	10 000	30 000	60 000	100 000
MOULE Gauche	1 Avant	8,57	8,76	12,15	11,3	12,55	13,94				
A-2	1 Centre	8,23	9,14	13,22	13,78	14,32	15,19				
100	1 Arrière	7,88	9,81	11,96	12,32	13,43	14,47				
	2 Avant	11,68	12,44	14,94	15,77	16,93	17,74				
	2 Centre	11,53	12,09	16,92	18,71	20,08	23				
	2 Arrière	10,87	12,61	15,79	16,72	19,2	20,83				
	3 Avant	13,28	13,89	16,09	16,58	17,87	19,53				
	3 Centre	13,26	13,28	16,03	17,45	20,9	22,31				
	3 Arrière	12,83	13,91	16,54	17,97	18,93	21,41				
	4 Avant	11,46	12,93	15,8	16,18	17,71	17,55				
	4 Centre	11,44	13,02	17,9	19,35	19,73	21,04				
	4 Arrière	11,49	12,78	16,59	17,94	18,25	20,08				
	5 Avant	10,14	12,42	13,73	14,55	15,4	16,51				
	5 Centre	10,16	12,31	14,84	15,86	16,61	18,09				
	5 Arrière	9,21	11,2	13,86	15,08	15,55	17,55				
MOULEDroit	6 Avant	11,99	12,55	13,23	14,85	16,62	18,32				
A-1	6 Centre	11,08	12,49	15,06	17	18,04	20,52				
100	6 Arrière	12,51	13,82	14,09	15,79	17,5	20,12				
	7 Avant	13,57	14,06	15,06	19,82	21,36	21,03				
	7 Centre	12,74	13,81	18,67	21,44	23,34	22,76				
	7 Arrière	13,65	13,71	16,65	18,96	21,07	23,59				
	8 Avant	12,31	12,98	16,42	19,39	21,21	21,7				
	8 Centre	12,14	12,71	16,16	19,35	23,8	26,1				
	8 Arrière	12,34	12,96	15,65	18,57	21,95	24,85				
	9 Avant	10,9	11,43	14,62	17,79	20,04	23,13				
	9 Centre	10,46	11,69	16,77	20,27	22,51	25,91				
	9 Arrière	10,11	11,46	14,53	18,09	20,91	23,82				
	10 Avant	8,62	10,56	14,24	16,3	17,72	21,12				
	10 Centre	9,48	10,75	15,49	19,3	20,83	24,06				
	10 Arrière	9,01	9,65	13,61	16,54	18,15	22,61				
%PI	Gauche		1,24	3,05	3,94	5,13	6,58	-12,05	-12,05	-12,05	-12,05
	Droite		0,92	3,06	5,96	8,08	10,41	-12,39	-12,39	-12,39	-12,39

		# sonde									
T° plaque droite	extérieur	T2									
	intérieur										
T° plaque gauche	extérieur	T1									
	intérieur										
T° régulateur				60	60	60	60				
T° air				60	60	60	60				

ANNEXE IX

ILLUSTRATIONS DES ÉTAPES DE L'ÉTUDE









Figure-A IX-1 Prélèvement des échantillons de Granby



Figure-A IX-2 Préparation des échantillons en laboratoire à l'ÉTS



Figure-A IX-3 Essais chimiques au laboratoire STEPPE de l'ÉTS



Figure-A IX-4 Essais physiques au laboratoire de matériaux à l'ÉTS









Figure-A IX-5 Tamisage et lavage des résidus sur le Site de Bromont



Figure-A IX-6 Abrasifs tamisés et lavés sur le Site de Bromont

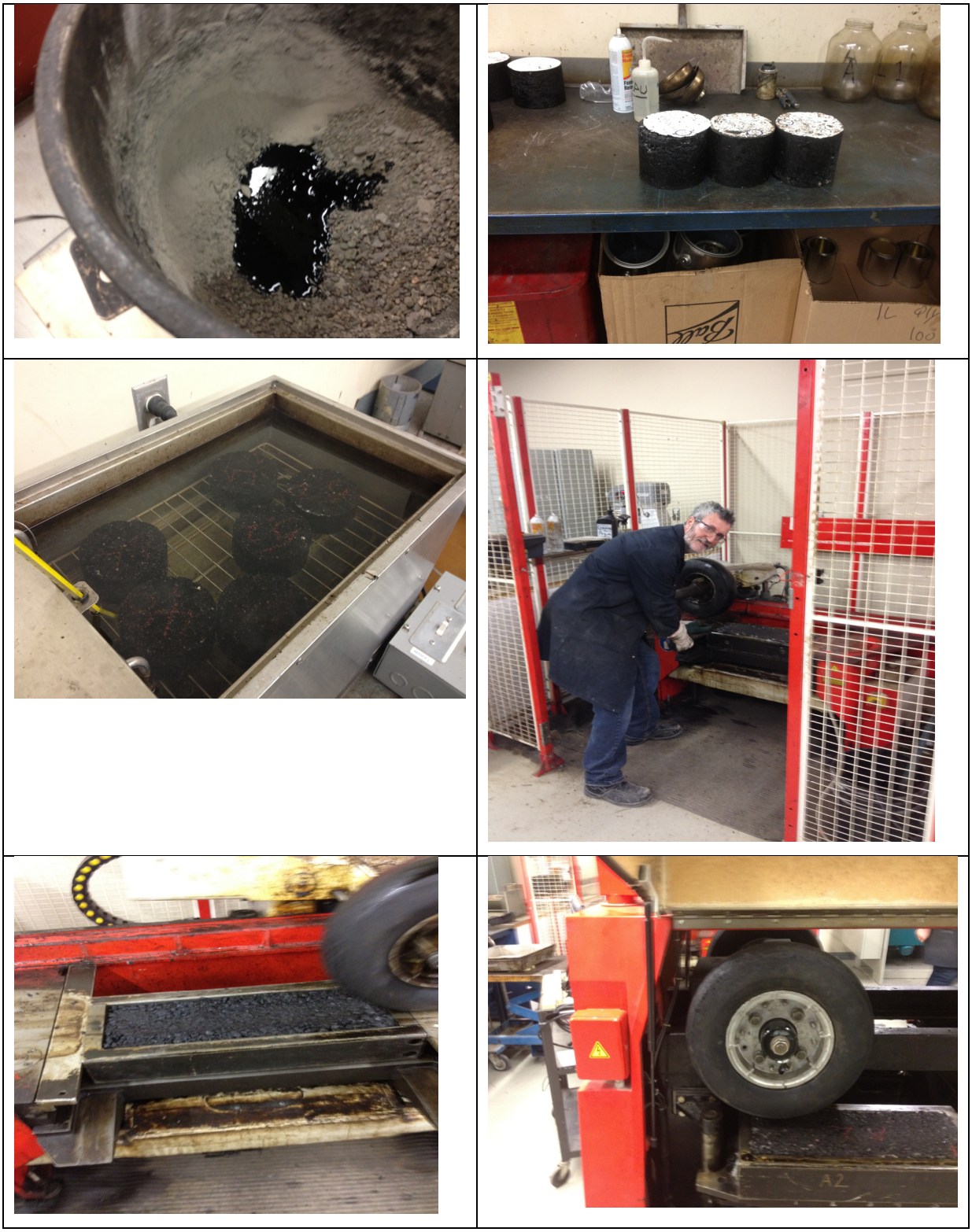


Figure-A IX-7 Confection des enrobés au laboratoire des enrobés à l'ÉTS

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AIPCR. 2010. *Base de données sur la neige et le verglas* Coll. « Les publications de l'Association mondiale de la Route », 2010R03FR: Association mondiale de la route, CT B.5. Viabilité hivernale / TC B.5. Winter services, 223 p.

ASTM. 1989. *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. Method C 131-89.

Blackburn, R.R., D.E. Amsler Sr et K.M. Bauer. 2004a. « Guidelines for Snow and Ice Control Materials and Methods ». In *Sixth International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology*. (Spokane, Washington, June 7-9, 2004), p. 31-49. Transportation Research Board.

Blackburn, R.R., K.M. Bauer, D.E. Amsler Sr, S.E. Boselly et A.D. McElroy. 2004b. *Snow and Ice Control: Guidelines for Materials and Methods*. Report 526. Washington DC: National Cooperative Highway Reserach Program (NCHR), 50 p. < http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_526.pdf >. Consulté le 02 Juillet 2012.

BNQ. 2002. *NQ 2560-114/2002 Travaux de génie civil-Granulats*. Bureau de Normalisation du Québec, 67 p.

Bradley, D. 1965. *The hydrocyclone*. New York: Pergamon.

Branchu, P., A.-L. Badin, B. Bechet, L. Eisenlohr, T. Le Priol, F. Marseille et E. Trielli. 2013. « Pollution d'origine routière et environnement de proximité ». *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement,* vol. 10, n° 4000.

Bruxelle, C. 2015. « Gestion des actifs ». In *Notes de cours MGC-870: Gestion de l'entretien des ouvrages d'infrastructures*. p. 224. Montréal: École de technologie supérieure.

CCMM. 2013. « Des projets de transport pour remodeler la ville ». *http://www.ccmm.qc.ca/Documents/presentations/2012_2013/10-R%C3%A9al%20M%C3%A9nard_OUI.pdf*.

CEAEQ, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, MDDEP,. 2001. « MA. 400 – HAP 1.1.Détermination des hydrocarbures aromatiques polycycliques : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse ».

CEAEQ, Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec, MDDEP. 2008. « CAHIER 8 ÉCHANTILLONNAGE DES MATIÈRES DANGEREUSES ». *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales*.

CEAEQ, Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec, MDDEP. 2010. « Détermination des métaux : méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon-MA. 200 – Mét. 1.2 ».

CEAEQ, Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec, MDDEP, . 2009. « Dosage des hydrocarbures pétroliers C_{10} à C_{50} dans les sols et les sédiments,MA. 416 – C_{10}-C_{50} 1.0 ».

City of Edmonton. 2005. « Winter Street Sand Recycling Program ». p. 9. < http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2005/donovan.pdf >.

CWP, Center for Water Protection.

CWP, Center for Water Protection. 2009. « ». *http://www.cwp.org*.

Davailles, A. 2011. « Effet de la concentration en solide sur les performances de séparation d'un hydrocyclone (simulations numériques et expériences de références) ». Toulouse, France, Institut national polytechnique de Toulouse, Université de Toulouse, 211 p.

Deletraz, G., et E. Paul. 1998. *Etat de l'art pour l'étude des impacts des transports routiers à proximité des routes et autoroutes*. ADEME no 97 93 022: Sociétés - Environnement - Territoire (SET), Laboratoire de la Montagne Alpine (LAMA), 10 p.

Derombise, G. 2012. « Comment choisir un produit d'exploitation hivernale ». In *Journée d'échanges, Viabilité Hivernale en milieu urbain*. (Metz, 20 juin 2012), p. 37. En ligne: Équipe VH PCI GeSiCHT. <http://www.viabilitehivernale.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/5_Guillaume_DEROMBISE-Les_fondants_routiers_cle0469d5.pdf >.

Deschamps, T, M. Benzaazoua, B. Bussière, T. Belem et M. Mbonimpa. 2006. « Mécanismes de rétention des métaux lourds en phase solide : cas de la stabilisation des sols contaminés et des déchets industriels ». *Vertico - la revue électronique en sciences de l'environnement,* vol. 7 n° 2.

DLC. 1997. « Évaluation de la performance des abrasifs ». *Info DLC, Direction du laboratoire des chaussées,* vol. Vol 2, n° 1, p. 2.

Dubé, J.S. 1997. « Application d'un protocole analytique à l'évaluation de la distribution géochimique des métaux lourds dans les sols contaminés ». Université Laval, 140 p. < Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (304402689). Retrieved from http://search.proquest.com/docview/304402689?accountid=27231 >.

Dunford, B., et P Haug. 2007. « Winter Street Sand Recycling ». In *2007 FCM Community Energy Planning Mission*. (Edmonton), sous la dir. de (FCM), Fédération canadienne des municipalités, p. 27.

FCM, Centre pour le développement des collectivités viables. 2007. *L'innovation incite Edmonton à adopter des pratiques de pointe en gestion des déchets*. Fédération canadienne des municipalités.

Freyssinet, P et al. 1998. « Évolution chimique et minéralogique des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères au cours de la matuation ». *Éditions BGRM* p. 146.

Gaber, Jean. 1995. « Pollution de proximité par voie aérienne. Constat et perspectives ». *SETRA, CSTR*.

Gertler, A., H. Kuhns, M. Abu-Allaban, C. Damm, J. Gillies, V. Etyemezian, R. Clayton et D. Proffitt. 2006. « A case study of the impact of winter road sand/salt and street sweeping on road dust re-entrainment ». *Atmospheric environment,* vol. 40, n^{o} 31, p. 5976-5985.

Gosselin, A., D. Blackburn et M. Bergeron. 1999. *Protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues à l'aide des technologies minéralogiques*. Ste-Foy, Ca: Section Éco-Innovation technologique, Programme de développement et de démonstration technologiques, Direction de la protection de l'environnement, 148 p.

Gruaz, M. 2004. « L'utilisation simultanée d'un fondant routier et d'un d'abrasif ». In *Viabilité hivernale*.
< http://www.viabilite-hivernale.developpement-durable.gouv.fr/l-utilisation-simultanee-d-un-fondant-routier-et-d-a6465.html >.

Haug, P. 2005. « Edmonton's Winter Street Sand Recycling Program ». *Snow and Ice Colloquium-Ontario Good Roads Association- Mississauga,Ontario, Edmonton Waste Management Center of Excellence*.

Hivernal des Routes. 2003. « Synthèses des meilleures pratiques de gestion des sels de voirie».

Mai Manga, M. 2011. « Caractérisation de l'opération d'un hydrocyclone en présence d'anomalies de fonctionnement ». Mémoire. Faculté des études supérieures, Université Laval, 170 p.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.427.9747&rep=rep1&type=pdf >.

MDDEFP, Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs ,. 2002. « Guide de Valorisation des Matières Résiduelles Inorganiques Non Dangereuses de Source Industrielle Comme Matériau de Construction ».

MDDEFP, Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs ,. 2012. « Lignes Directrices Sur La Gestion Des Matières Résiduelles Et Des Sols Contaminés Traités Par Stabilisation Et Solidification ».

MDDEP. 1998. « Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés». En ligne: Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs. < www.mddelcc.gouv.qc.ca >.

MDDEP. 2009. « Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique et d'asphalte issus des travaux de construction et de démolition et des résidus du secteur de la pierre de taille ». Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), 51 p.

MDDEP, Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs ,. 2002. « Guide de Valorisation des Matières Résiduelles Inorganiques Non Dangereuses de Source Industrielle Comme Matériau de Construction ».

MECA, Minnesota Erosion Control Association. 2009. « Sediment Reduction from Winter Road Maintenance ». *Great Lakes Commission: Great Lakes Basin Program with funds from the United States Department of Agriculture,* vol. Project #150808, n° USA.

Ministère des Transport du Québec (MTQ). 2011. « Plan ministériel de gestion environnementale des sels de voirie 2011-2014 ».

Mokwa, R., et A. Foster. 2013. *Testing and evaluation of recovered traction sanding material*. FHWA/MT-13-003/8213: The State of Montana, Department of Transportation, The U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 60 p.

MTO. 2005. « Déneigement et déglaçage ». Ministère des Transports de l'Ontario.

MTQ, Ministère des Transport du Québec 2011. « Plan ministériel de gestion environnementale des sels de voirie 2011-2014 ».

MTQ, Ministère des Transport du Québec 2010a. « Stratégie Québécoise pour une Gestion Environnementale des Sels de Voirie - Etat de situation partiel ».

MTQ, Ministère des Transports du Québec 1995. « Évaluation environnementale des résidus du balayage mécanique ».

MTQ, Ministère des Transports du Québec 2010b. « La gestion environnementale des sels de voirie au Québec, État de situation partiel ».

MTQ, Ministère des Transports du Québec 2014. « Registre des opérations hivernales ». < http://www.roh.prod/ >. Consulté le 01 septembre 2014.

MWLAP, Ministry of Water, Land and Air Protection. 2005. « Best Management Practices to Mitigate Road Dust from Winter Traction Materials ». *British Columbia, Canada*.

NCHRP. 2007. *Guidelines for the Selection of Snow and Ice Control Materials to Mitigate Environmental Impacts*. Report 577. Washington DC, USA: National cooperative highway research program 211 p.

Nixon, W.A. 2001. « Use of Abrasives in Winter Maintenance at the County Level ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,* vol. 1741, p. 42-46.

Pagotto, C. 1999. « Étude sur l'émission et le transfert dans les eaux et les sols des éléments traces métalliques et des hydrocarbures en domaine routier ». Thèse doctorale. Ecole des Mines de Nantes, Laboratoire central des ponts et chaussées, Université de Poitiers, Poitiers, France 238 p.

Pulley, A.K., et K. Baird. 2010. *Investigation of re-use options for used traction sand*. DTD Applied Research and Innovation Branch. Denver, Co: Colorado Department of Transportation (CDOT), 35 p.

Rietema, K. 1961. « Performance and Design of Hydrocyclone ». *Chemical Engineering Science,,* vol. 15, p. 298-325.

SETRA, Service d'étude sur les transports, les routes et leurs aménagements. 1995. « Pollution de proximité par voie aérienne, constat et perspectives, Note d'information, France ».

SETRA, Service d'étude sur les transports, les routes et leurs aménagements. 2004. « La pollution des sols et des végétaux à proximité des routes. Les éléments traces métalliques (ETM), Note d'information, France. ».

St-Laurent, S., S. Burelle et H. Ouellette. 2011. « Lignes directrices sur la gestion des matières résiduelles et des sols contaminés traités par stabilisation et solidification ». Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP).

Terney, Beth. « Pros and Cons of Sand on Ice and Snowpack ». *University of New Hampshire Technology Transfer center.*

Vaa, T. 2004. « Material distribution, performance and residual " Implementation of new sanding method in Norway" ». *Sixth International Symposium on snow Removal and Ice Control Technology,* vol. E-C063, p. 473-486.

Vieira, L.G.M., E.A. Barbosa, J.J.R. Damasceno et M.A.S. Barrozo. 2005. « Performance analysis and design of filtering hydrocyclones ». *Brazilian Journal of Chemical Engineering,* vol. 22, n^{o} 1, p. 143-152.

Ville de Granby. 2012a. *Données statistiques de la ville de Granby*.

Ville de Granby. 2012b. « Plan directeur de la circulation ».

Ville de Québec. 2009. « Rapport du comité d'amélioration de la performance ».

Ville de Sherbrooke. 2011. *Récupération et valorisation des abrasifs épandus sur les routes en hiver*. Rapport interne: Sherbrooke, 88 p.

WTC. 2005. « Using Salt and Sand for Winter Road Maintenance. ». *Wisconsin Transportation Bulletin*. Vol. No. 6, p. 4. <http://epdfiles.engr.wisc.edu/pdf_web_files/tic/bulletins/Bltn_006_SaltNSand.pdf >.