

DIMINUER LES ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES D'UN SITE D'EXTRACTION ET DE TRAITEMENT DE PIERRE CALCAIRE

par

Maxime Descôteaux

Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de
l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

dirigé par M. Alexandre Renaud M. Env.

CENTRE UNIVERSITAIRE DE FORMATION EN ENVIRONNEMENT

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Sherbrooke, Québec, Canada, 15 septembre 2012

SOMMAIRE

Mots clés : poussière, matière particulaire, particule, carrière, mine, minière, route, érosion, pierre, calcaire.

Les entreprises œuvrant dans le domaine de l'extraction et de la transformation de pierre doivent assurer l'acceptabilité sociale de leurs activités en minimisant les impacts environnementaux. Pour cette industrie, les émissions de poussières sont un enjeu crucial, car elles occasionnent divers impacts environnementaux. Cet ouvrage a pour objectif d'identifier les meilleures solutions de réduction des émissions de poussières pour un site d'extraction et de transformation de pierre calcaire. À cet effet, les sources de poussières sont identifiées et quantifiées. Des solutions de réduction pour les plus importantes de ces sources sont décrites et comparées sur la base de l'efficacité, des coûts, de l'applicabilité et des impacts environnementaux. Des recommandations concernant les solutions à implanter sont formulées. Une revue des connaissances actuelles relatives aux impacts environnementaux des poussières est aussi présentée.

Les pires impacts environnementaux sont subis par les humains, les animaux et les végétaux. D'autres impacts rapportés sont positifs, mais ils amenuisent surtout les impacts négatifs d'autres pollutions qui devraient être traitées à la source. Les voies de circulation et les superficies érodées par le vent sont les sources de poussières les plus importantes du site à l'étude. Les solutions de réduction de ces sources sont l'application d'eau (avec buses fixes ou camion-citerne), l'application d'abat-poussières chimiques, l'asphaltage, le positionnement d'écrans, la végétalisation et la réduction de la vitesse de la circulation. Les meilleures solutions identifiées sont l'application d'eau et la réduction de vitesse pour la circulation, alors que pour les superficies érodables, la végétalisation est préférable.

Sur le site à l'étude, il est suggéré de contrôler la vitesse des camions et d'instaurer un plan d'application d'eau comprenant des buses fixes, afin de libérer le camion-citerne déjà présent sur le site pour lui permettre de se concentrer sur certaines zones. La végétalisation est proposée pour contrôler l'érosion de piles de matériaux. Il est suggéré d'implanter des pratiques pour circonscrire la circulation et pour limiter les déversements de matériaux afin de maximiser les gains de réduction offerts par les mesures de contrôle.

REMERCIEMENTS

Réussir à insérer la rédaction de cet essai à travers mon emploi du temps n'a pas toujours été facile, mais j'ai pu compter sur le soutien de collègues, parents et amis pour y arriver.

Je remercie d'abord Alexandre Renaud, qui a permis la réalisation de cet essai en acceptant de le diriger et qui en a facilité la rédaction, en m'octroyant une position au sein de son équipe chez Graymont. J'en profite aussi pour souligner la participation de divers employés de cette entreprise qui ont accepté de répondre à mes questions, ce qui a permis de relever la qualité de cet essai. Plus particulièrement, Pierre Duchesneau, qui m'a beaucoup aidé à obtenir des données sur le site à l'étude, André Tessier, qui a répondu à plusieurs questions concernant le site, Rosanne Fortin et Keven Houde, qui ont fournis beaucoup d'informations concernant les méthodes de contrôle des poussières.

Ma famille et mes amis doivent être remerciés surtout pour leur compréhension lorsqu'ils m'invitaient à prendre part à une activité et que je me désistais pour rédiger mon essai, ou pire, lorsque je me présentais chez eux et que j'agissais en sauvage en passant mon temps à rédiger.

Je dois aussi remercier, avec tout l'amour que je lui porte, ma douce moitié, Lauréanne Marceau, qui m'a non seulement soutenu moralement, mais qui a aussi participé fortement à la correction du français dans mon essai.

Merci à vous tous.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES.....	4
1.1 Eau.....	5
1.1.1 Augmentation du pH.....	5
1.1.2 Augmentation de l'alcalinité	6
1.1.3 Modification de la productivité aquatique	7
1.1.4 Pénétration et réflexion de la lumière.....	8
1.2 Air.....	9
1.2.1 Modification de l'albédo	9
1.2.2 Réduction de la concentration en ozone dans la troposphère.....	10
1.2.3 Modification des régimes de précipitation	11
1.3 Sol.....	11
1.3.1 Augmentation du pH.....	11
1.3.2 Durcissement du sol	12
1.4 Flore	12
1.4.1 Altération des communautés de l'écosystème	12
1.4.2 Modification de la productivité des plantes.....	13
1.5 Humain.....	14
1.5.1 Réduction de la visibilité	14
1.5.2 Nuisance	15
1.5.3 Effets sur la santé.....	15
1.5.4 Transport de maladies	16
1.6 Faune	17
1.6.1 Dommages sur les branchies	17
1.7 Ressources.....	17

1.7.1	Gaspiilage des ressources.....	18
1.8	Résultats de la caractérisation des impacts environnementaux	18
2	DESCRIPTION DU SITE À L'ÉTUDE	21
2.1	Les carrières et l'extraction de la pierre	22
2.1.1	Sources de poussières	22
2.1.2	Mesure de réduction des émissions de poussières.....	23
2.2	L'usine de concassage et de pierre pulvérisée	23
2.2.1	Sources de poussières	24
2.2.2	Mesure de réduction des émissions de poussières.....	24
2.3	L'entreposage en piles des produits de pierre concassée.....	24
2.3.1	Sources de poussières	25
2.3.2	Mesure de réduction des émissions de poussières.....	25
2.4	Les voies de circulation	25
2.4.1	Sources de poussières	25
2.4.2	Mesure de réduction des émissions de poussières.....	26
2.5	La gestion du découvert	26
2.5.1	Sources de poussières	26
2.5.2	Mesure de réduction des émissions de poussières.....	26
2.6	Autre entreposage et superficie inutilisée	27
2.6.1	Sources de poussières	27
2.6.2	Mesure de réduction des émissions de poussières.....	27
3	CARACTÉRISATION DES SOURCES DE POUSSIÈRES	28
3.1	Méthodologie du calcul des émissions.....	28
3.1.1	Procédé de concassage, tamisage, points de chute et pulvérisation de la pierre	30
3.1.2	Séchoirs à pierre	33

3.1.3	Dépoussiéreurs	34
3.1.4	Manutention des matériaux par chargeur sur roues (pierre brute et produits finis)	34
3.1.5	Voies de circulation.....	35
3.1.6	Entreposage en piles et surfaces érodables	36
3.2	Résultats du calcul des émissions de poussières	37
4	SOLUTIONS DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES DES PRINCIPALES SOURCES.....	42
4.1	Arrosage avec de l'eau	43
4.1.1	Efficacité de réduction des émissions de poussières	43
4.1.2	Aspects environnementaux.....	46
4.1.3	Aspects techno-économiques.....	47
4.2	Abat-poussières chimiques.....	48
4.2.1	Efficacité de réduction des émissions de poussières	50
4.2.2	Aspects environnementaux.....	52
4.2.3	Aspects techno-économiques et comparaison finale des abat-poussières	53
4.3	Asphaltage	56
4.3.1	Efficacité de réduction des émissions de poussières	56
4.3.2	Aspects environnementaux.....	57
4.3.3	Aspects techno-économiques.....	58
4.4	Positionner des écrans	59
4.4.1	Efficacité de réduction des émissions de poussières	59
4.4.2	Aspects environnementaux.....	61
4.4.3	Aspects techno-économiques.....	61
4.5	Végétaliser	62
4.5.1	Efficacité de réduction des émissions de poussières	62
4.5.2	Aspects environnementaux.....	64

4.5.3	Aspects techno-économiques.....	64
4.6	Contrôle de la vitesse des véhicules.....	65
4.6.1	Efficacité de réduction des émissions de poussières	65
4.6.2	Aspects environnementaux.....	65
4.6.3	Aspects techno-économiques.....	65
4.7	Autres mesures	66
5	RECOMMANDATIONS.....	69
	CONCLUSION.....	75
	RÉFÉRENCES	77
	BIBLIOGRAPHIE	89
	ANNEXE 1 – DÉFINITION DE LA COTE GLOBALE OCTROYÉE AUX IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	95
	ANNEXE 2 – ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES DU SITE À L'ÉTUDE PAR ACTIVITÉ (2011)	96
	ANNEXE 3 – ÉMISSION DE POUSSIÈRES DU SITE À L'ÉTUDE POUR LE PROCÉDÉ DE CONCASSAGE (2011)	97

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 2.1 : Carte de l'utilisation du site à l'étude	21
Figure 3.1 : Les quatre éléments de l'estimation des émissions de poussières.....	29
Figure 3.2 : Schéma de procédé typique d'une usine de concassage et de pulvérisation de pierre	31
Figure 3.3 : Répartition de l'importance des émissions de poussières selon les activités sur le site à l'étude.....	37
Figure 3.4 : Répartition de l'importance des émissions de poussières du procédé de concassage de la pierre selon ses différentes composantes.....	39
Figure 4.1 : Efficacité de réduction des émissions de poussières de l'application d'eau en fonction du ratio d'humidité du sol.....	44
Figure 4.2 : Asperersion des voies de circulation par buses fixes	47
Figure 4.3 : Clôture brise-vent pour protéger des piles de matériaux	60
Figure 4.4 : Bandes caoutchoutées pour contenir les poussières d'un point de chute de matériaux.....	67
Figure 5.1 : Principales solutions de réduction des émissions de poussières recommandées pour le site à l'étude	72
Tableau 1.1 : Impacts environnementaux des émissions de poussières du site à l'étude	19
Tableau 3.1 : Effet des dépoussiéreurs sur les émissions du procédé de concassage (excluant le séchoir 2 non dépoussiéré).....	40
Tableau 4.1 : Facteurs influençant les émissions de particules à partir du sol.....	42
Tableau 4.2 : Estimation des taux et fréquences d'application d'eau nécessaire à la réduction des poussières sur le site à l'étude.....	45
Tableau 4.3 : Coûts d'immobilisation et récurrents pour l'utilisation d'un camion-citerne pour humidifier les routes du site à l'étude	48
Tableau 4.4 : Minimum et maximum d'efficacité de réduction des émissions de poussières par divers abat-poussières.....	50
Tableau 4.5 : Comparaison des coûts de divers abat-poussières distribués au Québec pour le site à l'étude.....	54

Tableau 4.6 : Coûts d'immobilisation et récurrents pour l'utilisation d'un camion aspirateur pour nettoyer les surfaces asphaltées d'une usine de concassage qui comprend 1,9 km de routes asphaltées à nettoyer.....	58
Tableau 5.1 : Comparaison de l'efficience de réduction des émissions de poussières pour les solutions proposées pour le site à l'étude (données par ha par an).....	69

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

\$	dollar canadien
µm	micron
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
cm	centimètre
ENCEM	Environnement carrières et matériaux
GIEC	Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
h	heure
ha	hectare
km	kilomètre
km ²	kilomètre carré
L	litre
m	mètre
m ²	mètre carré
m ³	mètre cube
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
PM ₁₀	particule de moins de 10 microns
PM _{2,5}	particule de moins de 2,5 microns
TM	Tonne Métrique
TPM	particules totales
USEPA	United States Environmental Protection Agency
V/V	volume sur volume
WRAP	Western Regional Air Partnership

INTRODUCTION

Au cours des dernières années, les activités minières ont été portées à l'avant-plan dans l'actualité québécoise. On en parle pour les emplois et revenus qu'elles créent, mais aussi pour les impacts environnementaux et sociaux qu'elles engendrent. Par exemple, avec son Plan Nord, le gouvernement libéral de Jean Charest s'est lancé dans une campagne d'information qui vise à souligner les bénéfices économiques de l'industrie minière (Gouvernement du Québec, 2009), alors que le récent long métrage de Richard Desjardins et Robert Monderie, *Trou story* (2012), dressait un sombre portrait de cette industrie. À travers cela, on constate la création de diverses initiatives citoyennes telles que l'Institut du Nouveau Monde et la coalition Pour que le Québec ait meilleure mine. Ces organismes agissent en tant qu'observateurs et commentateurs des activités de l'industrie minière et offrent une plateforme pour que les citoyens du Québec s'expriment sur le sujet. Les opinions rapportées par ces organismes sont d'ailleurs généralement peu favorables envers l'industrie (Institut du Nouveau Monde, 2012; Pour que le Québec ait meilleure mine, 2012). Dans un tel contexte, les entreprises œuvrant dans ce domaine ont intérêt à assurer l'acceptabilité sociale de leurs opérations.

Les émissions de poussières sont un aspect environnemental important des activités minières d'extraction et de la transformation de pierre, à un point tel que les nuisances qu'elles causent peuvent s'avérer intolérables pour les populations voisines. On peut citer en exemple l'affaire Ciment du Saint-Laurent inc. c. Barrette (2008) dont le jugement a contraint l'exploitant d'une usine de fabrication de ciment à verser des indemnités de plusieurs millions à ses voisins qui subissaient les émissions de poussières de son exploitation.

Au-delà des populations voisines qui peuvent être affectées, les exploitants doivent aussi respecter la réglementation en matière d'émissions de particules, dont les exigences deviennent de plus en plus précises et contraignantes. L'état canadien, en partenariat avec les provinces, dont le Québec, est en train de préciser ses exigences sur le sujet en développant des normes nationales en matière de qualité de l'air (Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2003). Le gouvernement provincial a aussi établi de nouvelles normes avec le *Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère* (R.R.Q., c. Q-2

r. 4.1), qui a été adopté en 2011. Au niveau des particules, ce règlement instaure des normes de qualité de l'air ambiant, impose des normes d'émissions et exige des performances minimales pour les équipements antipollution.

La pierre calcaire est une roche sédimentaire qui est à l'origine de produits utilisés dans des domaines aussi variés que la construction, l'agriculture, les pâtes et papiers, la transformation des métaux et le traitement des eaux usées. Ce type de pierre n'est présent au Québec que dans la vallée du Saint-Laurent. De ce fait, les sites d'extraction et de transformation sont tous situés dans cette région qui est la plus peuplée du Québec. La proximité des zones habitées fait en sorte que l'acceptabilité sociale de ces activités revêt un intérêt particulièrement important. Pour une entreprise qui extrait et traite de la pierre calcaire dans le sud du Québec, les nombreuses préoccupations que soulèvent les émissions de poussières en font un enjeu non négligeable. Il devient alors essentiel que ces entreprises s'intéressent sérieusement à trouver des moyens de contrôler leurs émissions.

Sur un site d'extraction et de transformation de pierre, les sources de poussières sont nombreuses et diversifiées. Les méthodes d'intervention qui visent à réduire ces émissions le sont tout autant, puisqu'il en existe plusieurs et qu'elles comportent toutes une particularité au niveau de leurs coûts, de leur efficacité, de leur applicabilité ou de leurs impacts environnementaux. En l'occurrence, il n'est pas toujours clair d'identifier la source de poussière qui soit la plus importante, ni la méthode de réduction des émissions qui soit la plus efficace à appliquer sur un site en particulier. Le présent document vise ainsi à identifier les meilleures solutions de réduction des poussières qui sont applicables à un site d'extraction et de transformation de pierre calcaire qui est situé à Saint-Marc-des-Carières et qui comprend une carrière et une usine exploitées par l'entreprise Graymont. Pour ce faire, il faut quantifier les émissions de poussières du site et inventorier les solutions de réduction applicables aux sources de poussières les plus importantes.

Ce document identifie donc les sources d'émissions de poussières de ce site, pour ensuite en quantifier les émissions actuelles. Un inventaire et une description détaillée des solutions de réduction applicables sont ensuite faits, ce qui permet enfin de les comparer et de déterminer lesquelles de ces solutions sont les meilleures. La comparaison termine

le document et elle est faite sous forme de recommandations. Par contre, avant d'entamer toute cette démarche, dans le but de bien saisir l'importance de la réduction des émissions de poussières, une revue des connaissances actuelles sur leurs impacts environnementaux est présentée.

Cette revue de littérature est faite à partir des publications les plus récentes, principalement des articles scientifiques qui sont révisés par les pairs, mais aussi des rapports de différentes instances gouvernementales qui permettent de confirmer des tendances générales. Au niveau de l'identification des sources de poussières, elle est faite en réalisant des visites sur le site et en consultant les plans d'ingénierie de l'usine. Pour l'estimation des émissions de poussières, elle est faite à l'aide des modèles développés par la United States Environmental Protection Agency (USEPA), qui peuvent être trouvés dans son rapport *AP-42* qui a été révisé en 2006. Ces modèles, qui sont ceux qu'Environnement Canada (2012a) recommande d'utiliser, sont basés sur des échantillonnages qui ont été réalisés sur divers sites d'extraction et de transformation de pierre. La USEPA (2006a) met d'ailleurs à la disposition du public la description de chacune des campagnes d'échantillonnage utilisées. Pour ce qui est de l'identification des solutions de réduction des émissions de poussières, des spécialistes de l'entreprise Graymont ont été consultés, ainsi que divers guides destinés aux entreprises qui sont produits par des organismes gouvernementaux. Ces solutions sont comparées sur la base de leur efficacité, de leurs coûts et de leur applicabilité. Une brève analyse des impacts environnementaux attendus de ces solutions est aussi présentée afin d'assurer que les réductions de poussières n'occasionnent pas d'autres impacts indésirables. L'efficacité et les impacts environnementaux des solutions sont principalement tirés d'expériences qui ont été recensées dans des articles scientifiques révisés par les pairs. Pour les coûts, ils sont tirés d'informations provenant de diverses sources à l'intérieur de Graymont.

La démarche présentée devrait donc permettre à l'entreprise Graymont de cibler les meilleures interventions à réaliser sur son site d'exploitation de Saint-Marc-des-Carrières. Par ailleurs, considérant que la production de poussières est une conséquence inhérente à la pratique des activités d'extraction et de traitement de pierre, il y a fort à parier que les informations présentées sont pertinentes pour la prise de décisions sur d'autres sites que celui qui est à l'étude.

1 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES

Les impacts environnementaux de la poussière de pierre qui est émise par le site à l'étude sont d'une part déterminés par les propriétés chimiques de la pierre d'origine et, d'autre part, par la taille des particules émises.

L'origine de la pierre traitée sur le site permet de comprendre sa nature chimique. La pierre calcaire se forme principalement par la consolidation de sédiments déposés dans les fonds marins, sédiments qui viennent de la précipitation des carbonates par des processus biologiques ou par des phénomènes physico-chimiques se produisant dans les fonds marins (Sanders et Friedman, 1967). C'est pourquoi une telle pierre comporte entre 60 et 100 % de carbonate de calcium (CaCO_3) (Graymont, 2012a). Selon les événements simultanés à cette précipitation de carbonate, ou bien par des altérations subséquentes de la pierre, d'autres matériaux peuvent y être retrouvés, tels que du carbonate de magnésium (MgCO_3), de la pyrite (FeS_2) et de la sidérite (FeCO_3), ainsi que des minéraux argileux (ex. : le quartz (SiO_2) et les feldspaths (KAlSi_3O_8 , $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)) (King *et al.*, 2012; Westphal, 2006). À travers les gisements, il est aussi possible de retrouver d'importants nodules de chaille (SiO_2), de pyrite et de sidérite (King *et al.*, 2012).

La taille des particules est une autre propriété des poussières qui détermine leurs effets sur l'environnement. C'est pourquoi les matières particulaires sont généralement définies selon leur taille, soit les particules totales (TSP), les particules de moins de 10 μm (PM_{10}) et celles de moins de 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$). Ces trois classes sont cumulatives, c'est-à-dire que les TSP incluent les PM_{10} et que les PM_{10} incluent les $\text{PM}_{2,5}$. Les TSP sont composées de toutes les particules qui peuvent être en suspension dans l'atmosphère et elles sont principalement de moins de 62,5 μm , bien qu'elles puissent atteindre jusqu'à 80 μm selon certains auteurs. Les plus petites particules (<20 μm) sont généralement celles qui se transportent sur les plus longues distances. Certains modèles ont suggéré que les particules les plus grandes (31 à 62 μm) pouvaient voyager jusqu'à 320 km de la source alors que les particules de taille intermédiaire (16 à 31 μm) iraient jusqu'à 1 600 km. Pour leur part, les particules plus fines pourraient se disperser à travers le monde. (Goudie et Middleton, 2006a)

Dans ce chapitre, les impacts environnementaux sont décrits pour chacune des composantes de l'environnement, comme suggéré par la norme ISO 14 001-2004 (ISO, 2004a), soit : l'eau, l'air, le sol, l'humain, la faune, la flore et les ressources naturelles. Ensuite, dans la dernière section, chacun des impacts environnementaux est caractérisé selon ce qui est proposé dans la norme ISO 14 004-2004 (ISO, 2004b). Les informations permettant d'établir cette caractérisation qualitative sont d'abord présentées dans les sections qui suivent.

1.1 Eau

Les plans d'eau qui sont situés aux alentours du site à l'étude reçoivent vraisemblablement des dépôts de poussières issues des activités du site. Les caractéristiques physico-chimiques de ces eaux peuvent être modifiées, et ce, selon les trois points de cette section, soit l'augmentation du pH, l'augmentation de l'alcalinité et la modification de la productivité.

1.1.1 Augmentation du pH

La composition chimique de la pierre extraite du site à l'étude révèle un fort taux de carbonates, ce qui fait en sorte que la poussière de cette pierre est alcaline. Le pH d'une solution saturée par une telle pierre pulvérisée est aux alentours de 8 à 9,2 (Graymont, 2012a). Les apports de cette poussière dans les cours d'eau peuvent donc en augmenter le pH des eaux naturelles qui se situe généralement légèrement en dessous de 7.

Dans l'environnement, une hausse de pH entre 8 et 9,2 ne serait pas suffisante pour compromettre la vie aquatique, mais peut compromettre la baignade, en plus d'empêcher l'utilisation de cette eau pour des fins de consommation humaine (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP), 2012).

En Espagne, la déposition de sable du Sahara, qui est de l'ordre de 5,2 TM/km² par an (Goudie et Middleton, 2006b), est responsable de l'élévation du pH dans les eaux de ruissellement (Avila et Penuelas, 1999). Aussi, l'eau des rivières dans un rayon de 10 km autour d'une usine de ciment au Nigeria a été échantillonnée par Olaleye et Oluyemi (2010). Ces derniers ont montré l'influence de la déposition des poussières de

l'usine sur le pH des cours d'eau avoisinants. Ces poussières se déposaient à un taux de 5,3 TM/km² par mois. Bien que le sable du Sahara et les poussières d'une usine de ciment aient des caractéristiques chimiques légèrement différentes de la pierre calcaire extraite au site à l'étude, les résultats des deux études citées permettent de croire que le pH des plans d'eau à proximité est augmenté par les émissions de poussières du site à l'étude.

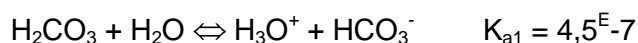
1.1.2 Augmentation de l'alcalinité

La présence de carbonates dans la poussière de pierre du site à l'étude est une source d'alcalinité, ce qui offre un pouvoir tampon régi selon le système de réactions suivant, tiré de Olivier (2009) :

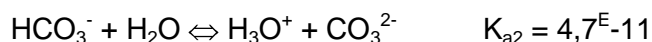
Dissolution du CO₂ de l'air dans l'eau, formation d'acide carbonique



Formation de bicarbonates



Formation de carbonates



Du côté droit des deux dernières équations, on remarque qu'avec l'ajout d'une source externe d'acidité (H₃O⁺), les carbonates peuvent réagir avec ces H₃O⁺, ce qui poussera la réaction vers la gauche et évitera l'augmentation du pH par l'augmentation de la concentration de H₃O⁺. De cette façon, le carbonate de calcium de la pierre calcaire peut offrir un pouvoir tampon à l'eau.

L'impact attendu de cette alcalinité est une plus grande stabilité du pH des plans d'eau où la poussière de pierre se retrouve, donc une meilleure résistance aux précipitations acides (Bellehumeur *et al.*, 2000). Les cours d'eau immédiats au site à l'étude s'appuient déjà sur une base de pierre calcaire, ce qui leur assure une certaine alcalinité. L'impact des poussières de pierre sur l'alcalinité de l'eau devrait donc être minime. Par contre, considérant la distance de déplacement potentiel des poussières, il est possible que les poussières se déplacent suffisamment au nord pour atteindre les régions où le Bouclier canadien domine, là où l'alcalinité disponible au fond des cours d'eau est moins

importante (Dupont, 1992; Houle *et al.*, 2004; MDDEP, 1999). De ce fait, les poussières émises par le site à l'étude pourraient avoir un certain impact positif sur l'alcalinité de l'eau, mais principalement à de grandes distances du site.

On peut répertorier un exemple potentiel d'un tel effet sur les eaux, c'est-à-dire que l'on soupçonne les apports de sable en provenance du Sahara d'être à l'origine de la stabilité du pH dans les lacs des Alpes et des Pyrénées. Ces lacs possèdent une très faible alcalinité. Malgré cela, ils ont résisté à s'acidifier sous la pression des précipitations acides, à l'instar de plusieurs lacs semblables en Scandinavie où la déposition de sable en provenance du Sahara est pratiquement nulle en comparaison à des valeurs autour de 0,2 TM/km² par an dans les Alpes françaises. (Psenner 1999)

Le sable du Sahara ne comporte que 8 % de carbonate (Goudie et Middleton, 2006b) et un apport aussi faible que 0,2 TM/km² par an aurait un impact sur l'alcalinité des lacs (Psenner 1999). Considérant la teneur en carbonate beaucoup plus élevée dans la pierre du site à l'étude, il semble possible que ses émissions de poussières puissent avoir un impact positif sur l'alcalinité des eaux de plans d'eau au nord du site.

1.1.3 Modification de la productivité aquatique

Adejumo *et al.* (1994) ont montré que la déposition des poussières émises d'une usine de production de ciment modifiait les paramètres physico-chimiques de l'environnement autour de l'usine, en plus d'augmenter la concentration en divers éléments dans le sol et l'eau. Certains des éléments ainsi amendés jouent un rôle dans la physiologie du phytoplancton et des plantes aquatiques, ce qui peut avoir des impacts sur la productivité de ces organismes autotrophes.

Plusieurs publications ont rapporté que les émissions de poussières comprenant des éléments tels que le fer, le magnésium, le phosphore ou le molybdène augmentaient la productivité des organismes autotrophes aquatiques (Goudie et Middleton, 2006c; Engelstaedter *et al.*, 2006). Ces éléments ont des rôles précis dans la physiologie de ces organismes et lorsque l'un de ces éléments est en présence insuffisante dans l'environnement, il limite la productivité de ces organismes. De cette façon, si une

poussière déposée vient enrichir le milieu d'un de ces éléments qui était jusque-là limitant, cela permet une augmentation de la productivité.

La pierre calcaire peut contenir du magnésium, du fer, du phosphore et d'autres éléments nutritifs (Graymont, 2011a), ce qui pourrait augmenter la productivité des plans d'eau. D'autre part, Galvez-Cloutier *et al.* (2012) ont montré que le carbonate de calcium de la pierre calcaire avait une forte capacité à faire précipiter le phosphore et d'autres éléments nutritifs tels que le fer, les rendant alors indisponibles aux organismes autotrophes dans l'eau. Ainsi, dans le cas où ces éléments limitent la productivité des organismes, la poussière de pierre calcaire limiterait la productivité en précipitant les éléments nutritifs, ce qui atténue l'eutrophisation des plans d'eau et réduit l'incidence des cyanobactéries.

L'augmentation de la productivité d'un plan d'eau peut être considérée comme bénéfique ou bien destructrice, selon le niveau de productivité atteint. Une trop grande productivité entraînera des phénomènes liés à l'eutrophisation, alors qu'une productivité moyenne permettra à une faune et à une flore riche de s'installer (Kalf, 2002). Le bassin versant de la rivière Sainte-Anne, dans lequel se trouve le site à l'étude, connaît des problématiques d'eutrophisation, notamment à cause d'une importante disponibilité du phosphore (Corporation d'aménagement et de protection de la Sainte-Anne, 2006). Cela laisse donc croire à un effet négatif de l'augmentation de la productivité. Ainsi, on peut s'attendre à ce que la poussière du site à l'étude ait un effet positif sur l'environnement en précipitant le phosphore en excès dans les cours d'eau, ce qui limitera la productivité de l'écosystème.

1.1.4 Pénétration et réflexion de la lumière

La déposition de particules dans l'eau peut modifier la façon dont la lumière y pénètre, ainsi que la façon dont l'eau reflète la lumière (Claustre *et al.*, 2002). Galvez-Cloutier *et al.* (2012) ont suivi l'évolution de la pénétration de la lumière dans l'eau d'un lac eutrophe où on avait ajouté de la pierre calcaire. Les résultats de leur expérience montrent que la pénétration de la lumière était meilleure avec l'ajout de pierre calcaire, manifestement en raison de la capacité de précipitation du calcaire de la pierre qui réduisait les matières en suspension et les matières dissoutes dans l'eau (Galvez-Cloutier *et al.*, 2012).

La réflexion de la lumière par l'eau peut aussi être influencée par la poussière qui s'y dépose. Claustre *et al.* (2002) ont émis l'hypothèse que, dans la Méditerranée, la portion de lumière absorbée par l'eau qui n'était pas attribuable à la chlorophylle était due à l'absorption par les particules de poussières qui restaient en suspension dans la colonne d'eau. Cette modification de la réflexion de la lumière serait particulièrement perceptible dans le cas d'un plan d'eau oligotrophe et donnerait une teinte plus verte à l'eau.

On peut donc s'attendre à ce que la déposition de la poussière en provenance du site à l'étude occasionne une augmentation de la transparence de l'eau dans le cas de plans d'eau eutrophes et une augmentation de la teinte verte de l'eau dans le cas des plans d'eau oligotrophes. Ces modifications organoleptiques de l'eau sont généralement perçues comme positives par la population (MDDEP, 2012).

1.2 Air

Lorsqu'elle est émise, la poussière est en suspension dans l'atmosphère pour un certain temps. Pendant cette période, la poussière peut affecter la qualité de l'air, et ce, en modifiant la façon dont la lumière la traverse et en interagissant avec les autres composantes de l'atmosphère. De cette façon, les poussières peuvent influencer l'albédo de l'atmosphère, la concentration en ozone et les régimes de précipitations, dont le détail de ces effets est présenté dans cette section.

1.2.1 Modification de l'albédo

Un des effets des émissions de poussières est l'absorption ou la réflexion de la lumière dans l'atmosphère. Ceci fait en sorte de modifier l'albédo de la terre, ce qui a des effets sur la température de celle-ci, localement, mais aussi globalement. Goudie et Middleton (2006c) affirment qu'il est difficile de déterminer la tendance générale de cet effet des poussières, car celles-ci varient en taille, en forme et en composition, ce qui module leur capacité respective d'absorption ou de réflexion de la lumière. Selon le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) (2001), les particules de sol qui sont émises dans l'atmosphère ont généralement un effet de réflexion de la lumière suffisamment important pour réfléchir plus de lumière qu'elles n'en

absorbent, ce qui crée un effet de refroidissement de l'atmosphère par une augmentation de l'albédo de la terre. Cet effet pourrait par contre être inverse dans le cas où le sol possède déjà un albédo qui réfléchit la majorité de la lumière, tel que lorsque le sol est recouvert de neige. Cet effet a été observé dans les Alpes, où la poussière déposée en provenance du Sahara augmentait la vitesse de fonte de glacier à cause d'une réduction de l'albédo de la neige souillée par la poussière (Engelstaedter *et al.*, 2006). L'effet de la poussière émise par le site à l'étude reste donc difficile à évaluer. Les publications sur le sujet s'entendent d'ailleurs pour dire que les données mesurées sur ces effets sont fragmentaires et que la compréhension de la contribution des poussières sur l'effet de serre nécessite d'être approfondie (Engelstaedter *et al.*, 2006; GIEC, 2001; Goudie et Middleton, 2006c).

1.2.2 Réduction de la concentration en ozone dans la troposphère

Les poussières émises dans l'atmosphère réagissent avec les molécules d'ozone (O_3) qu'elles rencontrent, ce qui a comme effet de réduire la concentration en ozone dans la troposphère (Goudie et Middleton, 2006c). Ce phénomène a été corroboré avec des mesures prises en Italie, où on a réalisé que la concentration en ozone dans la troposphère était la plus faible pendant des épisodes de grande déposition de sable en provenance du Sahara (Bonasoni *et al.*, 2004). L'accumulation d'ozone troposphérique joue un rôle déterminant dans la formation de smogs photochimiques (Olivier, 2009). Ainsi, les poussières présentes dans la troposphère peuvent contribuer à réduire la formation de smogs photochimiques.

Ce genre de smogs se forme principalement autour des territoires largement urbanisés, là où il y a une grande combustion d'hydrocarbures (Grosjean, 2002; Jessen, 2007). Le site à l'étude est dans une région agricole, relativement éloignée des zones densément urbanisées. Les émissions de poussières du site à l'étude ont donc probablement un impact limité sur la formation des smogs photochimiques.

1.2.3 Modification des régimes de précipitation

De façon générale, les auteurs s'entendent pour affirmer que les particules présentes dans l'atmosphère permettent aux nuages d'accumuler plus d'eau avant de mener à une précipitation, ce qui augmente la durée de vie d'un nuage et réduirait donc la fréquence des précipitations (GIEC, 2001; Goudie et Middleton, 2006c). On peut alors s'attendre à ce que les particules émises par le site à l'étude aient cet effet sur les précipitations dans la région. Il faut en outre noter que certains auteurs croient qu'un effet inverse pourrait contrebalancer ce dernier, car les particules peuvent favoriser la formation de glace dans les nuages, ce qui déclencherait prématurément les précipitations dans certains nuages (Toon, 2003).

Outre le fait que les particules dans l'atmosphère influencent les précipitations, elles auraient un effet sur le réchauffement planétaire, puisqu'en augmentant la durée de vie et la densité des nuages, ils pourraient absorber ou refléter plus de lumière. Par contre, la compréhension de ces mécanismes est encore trop embryonnaire pour avancer le sens et l'ampleur de cet effet. (GIEC, 2001; Goudie et Middleton, 2006c)

1.3 Sol

Une fois déposées sur le sol, les poussières émises du site modifient les caractéristiques des sols selon les propriétés chimiques qu'elles présentent. De cette façon, le pH et la cohésion entre les molécules du sol sont influencés, comme il est décrit ci-après.

1.3.1 Augmentation du pH

De même qu'il a été décrit dans la section « Eau » de ce chapitre, le pH du sol peut être augmenté par la déposition des poussières du site à l'étude. Cet effet pourrait réduire l'incidence des précipitations acides dans la région autour du site à l'étude, tel qu'observé dans d'autres études sur la déposition de poussières alcalines (Avila et Rodà, 2002; Delmas *et al.*, 1996). Divers impacts négatifs ont été identifiés en ce qui concerne l'incidence des précipitations acides sur les plantes (Aber et Mellilo, 2001a). La hausse du

pH occasionnée par les poussières du site à l'étude pourrait donc réduire l'incidence de ces précipitations sur les plantes.

De plus, si l'apport de poussières est suffisamment élevé pour supplanter l'acidité qui provient des pluies, on peut s'attendre à ce que la hausse de pH ait un effet bénéfique sur la retenue et la disponibilité de nutriments essentiels aux plantes dans le sol, ce qui favoriserait la croissance de certaines plantes (Aber et Mellilo, 2001b). Ce dernier aspect est approfondi dans la section « Flore » de ce chapitre.

1.3.2 Durcissement du sol

La poussière qui comprend une certaine fraction de calcaire est responsable de la formation d'une croûte de sol dans les régions arides et semi-arides (Goudie et Middleton, 2006c). Considérant que le site à l'étude n'est pas situé dans une telle région et qu'aucune mention d'un tel effet dans les régions tempérées n'ait été relevée, il est peu probable que ce mécanisme soit important dans ce cas précis.

1.4 Flore

Tel que vu dans les précédentes sections, les apports de poussières modifient les conditions de l'environnement. Les plantes étant étroitement en lien avec l'eau, l'air et le sol, elles subissent ces modifications comme il est décrit dans cette section.

1.4.1 Altération des communautés de l'écosystème

La déposition de poussières occasionne l'enrichissement des milieux en certains éléments qui sont contenus dans la poussière (Adejumo *et al.*, 1994). Olaleye et Oluyemi (2010) ont montré que les communautés phytoplanctoniques des cours d'eau autour d'une usine de ciment étaient grandement influencées par la poussière qui s'y déposait. Les résultats de leurs échantillonnages ont montré que, d'une part, le nombre d'espèces retrouvées était plus faible autour de l'usine et que, d'autre part, les communautés phytoplanctoniques étaient composées principalement d'espèces alcalinophiles diatomées. Cette composition des communautés était probablement attribuable au pH alcalin et à la présence accrue de calcium dans les eaux (*ibid*). Comme il a été avancé dans la section « Eau » de ce

chapitre, la poussière du site à l'étude peut effectivement apporter une augmentation du pH de l'eau ainsi qu'une hausse de la concentration en calcium. Les apports de poussières du site à l'étude peuvent donc avoir un effet perturbateur sur les communautés de l'écosystème, mais il faut considérer que les eaux autour du site sont potentiellement naturellement alcalines et riches en calcium, ce qui fait que la poussière du site pourrait avoir un effet négligeable en comparaison avec le caractère naturel des eaux (Olaleye et Oluyemi, 2010). On peut donc s'attendre à ce que cet effet soit perceptible uniquement dans les cours d'eau adjacents au site à l'étude, où la déposition de poussières est la plus importante.

1.4.2 Modification de la productivité des plantes

Divers travaux ont montré que les apports de poussières de différentes sources avaient un impact négatif sur le taux de photosynthèse des plantes, soit par des interactions physiologiques, soit par réduction de la lumière qui atteint les organes photosynthétiques (New-Zealand Ministry for the Environment, 2001). Par exemple, Mcree (1984) a rapporté les effets négatifs de la poussière émise de routes non asphaltées, alors que Nanos et Ilias (2007) ont mesuré une réduction photosynthétique chez des oliviers dont les feuilles recevaient des dépôts de poussières d'une usine de ciment. Il apparaît que ces effets sur la photosynthèse nuisent aux plantes à un point où leur croissance et reproduction est réduite (Mcree, 1984).

Il faut par contre noter que dans les études mentionnées, les effets étaient observés uniquement à de forts taux de déposition de poussières. Par exemple, pour l'étude de Mcree (1984), les effets n'étaient pas mesurables au-delà de 250 m d'une route non asphaltée. Il semble donc que les émissions de poussières du site à l'étude puissent nuire à la photosynthèse chez les plantes, mais seulement pour les plantes les plus près de la source d'émission, là où le taux de déposition est le plus élevé.

Pour ce qui est des plantes présentes à des distances plus importantes, comme il a été mentionné à la section « Sol » de ce chapitre, ce serait potentiellement une hausse du pH qui pourrait influencer leur productivité. Pour la majorité des plantes cultivées en agriculture, on devrait s'attendre à une augmentation de leur productivité. La plupart des

processus liés à l'accès à l'azote pour ces plantes mènent à l'acidification du sol (Bolen *et al.*, 1991). L'acidification du sol influence divers autres processus et fait en sorte de réduire la disponibilité de l'azote (Edmeades *et al.*, 1984). Ainsi, les poussières de pierre calcaire peuvent contribuer à augmenter ou du moins à maintenir la productivité des sols agricoles. Enfin, les apports de nutriments essentiels tels que le magnésium contenu dans les poussières peuvent aussi augmenter la productivité lorsque ces nutriments sont en carence dans le sol (Aber et Melillo, 2001b).

On peut donc affirmer qu'à faible distance du site, l'impact des poussières sur la productivité des plantes sera négatif, alors qu'à plus grande distance, cet impact sera plutôt positif.

1.5 Humain

On peut distinguer deux types d'effets sur les êtres humains. Les effets qui affectent leur santé et les effets qui affectent leur bien-être. Les effets sur la santé sont surtout liés à l'inhalation des particules (Nel, 2005). Pour ce qui est des effets affectant le bien-être, ils regroupent les effets limitant la jouissance des biens et détruisant ou altérant les biens. Cette section traite d'abord de deux effets sur le bien-être des humains, alors que la suite concerne des effets sur leur santé.

1.5.1 Réduction de la visibilité

La réduction de la visibilité est un impact important des poussières émises par le site. Ces impacts ont été observés à des échelles beaucoup plus grandes, telles que lors d'une tempête de poussières sur la route *Interstate 5* aux États-Unis, où 164 véhicules ont été impliqués dans un carambolage (Pauley *et al.*, 1996).

Les émissions de poussières, lorsqu'elles sont suffisamment denses pour réduire la visibilité, causent de sérieux problèmes de sécurité. De telles émissions sont observées directement sur le site à l'étude, ce qui cause des dangers aux travailleurs et visiteurs sur le site. On peut aussi parfois observer ces émissions en dehors du site à l'étude en raison

de la déposition de poussières transportées par les véhicules sur les routes à la sortie du site. (Tessier, 2012)

1.5.2 Nuisance

La principale nuisance associée aux poussières est le nettoyage qu'obligent les accumulations de poussières (Huszar et Piper, 1986; Tozer, 2012; Williams et Young, 1999). Dans leur évaluation de cet impact des poussières sur la vie des habitants du Nouveau-Mexique, Huszar et Piper (1986) avaient inclus tout ce qui était relié à l'entretien des maisons et qui était dû aux poussières en provenance de l'érosion des déserts environnants. Ils ont effectivement trouvé que l'incidence des bris de matériel par l'érosion était très faible, alors que celui du nettoyage dû à l'accumulation de poussières était le plus important. Il est de mise de mentionner le jugement de l'affaire Ciment du Saint-Laurent inc. c. Barrette qui a contraint une entreprise exploitant une usine de ciment à dédommager ses voisins résidents pour les nuisances occasionnées par la déposition de poussières. Ces nuisances provenaient principalement des nettoyages nécessaires de leurs biens. On peut donc s'attendre à un effet semblable sur les résidences à proximité du site à l'étude, bien que l'intensité de déposition des poussières puisse être différente.

1.5.3 Effets sur la santé

L'exposition aux matières particulaires a été associée à une réduction de l'espérance de vie aux États-Unis (Dockery *et al.*, 1993; Pope III *et al.*, 2009) et à une hausse de la morbidité (Samet *et al.*, 2000). Les principales incidences sont l'inflammation des voies respiratoires qui peuvent mener à l'asthme et aux bronchites chroniques ainsi que des problèmes cardiaques et la mort subite (Nel, 2005). Par exemple, Samet *et al.* (2000) ont trouvé une augmentation de 0,51 % du taux de mortalité pour chaque augmentation de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{10} , et, pour la même augmentation en PM_{10} , ils ont observé une hausse de 0,68 % de l'incidence des maladies cardio-vasculaires et respiratoires.

La taille, la forme et la composition des matières particulaires déterminent grandement leur toxicité envers l'être humain. Il apparaît que les matières particulaires de plus de 2,5 μm ont le plus faible potentiel de toxicité, alors que celles qui sont de moins de 1 μm

sont les plus toxiques. De plus, les auteurs s'entendent pour affirmer que les particules contenant du carbone organique, dont celles issues de la combustion, sont les particules qui revêtent les caractéristiques les plus toxiques. La principale caractéristique identifiée responsable de la toxicité de ces particules serait la capacité des molécules et éléments qui la composent à réaliser des réactions d'oxydoréduction avec les tissus des voies respiratoires. (Nel, 2005; USEPA, 2004)

Le présent ouvrage ne visait pas l'estimation des émissions de particules des sources de combustion du site à l'étude, mais plutôt les émissions d'origine minérale. Il semble donc que les émissions de poussières qui sont traitées ici devraient représenter un moindre danger pour la santé humaine. Le principal mécanisme qui pourrait laisser croire que les matières particulaires dont il est question peuvent avoir des effets sur la santé est l'abrasion physique des voies respiratoires, ce qui est un mécanisme de moindre importance dans la toxicité des matières particulaires (Nel, 2005).

Malgré le fait que les matières particulaires traitées dans ce document semblent avoir un impact limité sur la santé, il faut noter que les véhicules et séchoirs à pierres présents sur le site sont des sources de matières particulaires organiques de combustion qui, elles, représentent de plus grands risques pour la santé.

1.5.4 Transport de maladies

Les matières particulaires dans l'atmosphère sont des vecteurs de virus, de bactéries et d'autres pathogènes (Goudie et Middleton, 2006c). Un exemple assez explicite de cela provient des mesures réalisées par Chen *et al.* (2010) qui révèlent des taux plus importants de concentration du virus de la grippe dans l'atmosphère de Taiwan lorsque des événements d'entraînement de poussières subviennent dans la ville. Les poussières du site à l'étude pourraient donc également agir de la sorte.

1.6 Faune

Les impacts sur la faune terrestre sont probablement très semblables aux effets sur la santé chez les humains. Par contre, très peu d'informations sur ce genre d'effet sont disponibles. Un effet potentiel sur la faune aquatique peut par contre être identifié.

1.6.1 Dommages sur les branchies

Une fois que la poussière émise par le site est déposée sur une surface quelconque ou directement sur l'eau, cette poussière peut être entraînée dans un plan d'eau et contribuer à en augmenter la concentration en matières en suspension, tel qu'il a été observé par Olaleye et Oluyemi (2010). L'augmentation en matières en suspension dans l'eau a été reconnue pour créer des dommages aux branchies des organismes aquatiques (Au *et al.*, 2004; Li et Shen, 2012; Cheung *et al.*, 2005).

Les concentrations de matières en suspension observées par Olaleye et Oluyemi (2010) étaient occasionnées par des taux de déposition de poussières importants (entre 17 et 25 TM/km² par mois). Une telle augmentation des matières en suspension est donc attendue seulement dans les zones les plus rapprochées du site à l'étude, là où la déposition est la plus forte. Là où la déposition est plus faible, il est plus probable d'observer une réduction des matières en suspension qui serait causée par la capacité du calcaire à précipiter d'autres polluants (Galvez-Cloutier *et al.*, 2012). On peut donc s'attendre à une augmentation de matières en suspension, mais seulement pour les plans d'eau directement adjacents au site à l'étude. C'est donc seulement là que les effets néfastes sur les branchies des organismes aquatiques pourraient être observés.

1.7 Ressources

La principale ressource consommée dans le procédé du site à l'étude est la pierre calcaire extraite. On peut aussi considérer l'énergie consommée pour l'extraction et le traitement de cette pierre. Cette énergie provient principalement de l'électricité, puis des combustibles fossiles. Le seul impact identifiable des émissions de poussières du site sur les ressources est le gaspillage de celles-ci.

1.7.1 Gaspillage des ressources

Les émissions de poussières sont des ressources perdues pour l'entreprise et pour les générations futures. La pierre qui disparaît en poussières dans l'atmosphère n'est pas vendue et utilisée pour sa valeur. De plus, l'énergie qui a été dépensée pour l'extraction et le traitement de cette pierre disparaît en poussières, ce qui constitue aussi un gaspillage.

1.8 Résultats de la caractérisation des impacts environnementaux

Le tableau 1.1 présente les résultats généraux de la caractérisation qualitative des impacts environnementaux. Cette caractérisation est basée sur les critères proposés par la norme ISO 14 004-2004 (ISO, 2004b) qui sont définis dans le présent document comme suit : le type (positif ou négatif), la sévérité (altération légère, moyenne ou totale d'un élément de l'environnement), l'étendue (locale (<10 km), régionale (<100 km) ou nationale (>100 km)), la durée (court, moyen ou long terme) et la fréquence. La fréquence de l'ensemble des impacts environnementaux reliés aux émissions de poussières dépend du degré d'activité et d'émission de poussières sur le site à l'étude. Cela étant la même chose pour tous les impacts, ce critère n'a pas été considéré dans la caractérisation. Ainsi, sauf pour le type d'impact qui est dichotomique, chacun des autres critères comporte trois niveaux, qui ont été évalués et cotés pour chacun des impacts. Les cotes attribuées ont permis d'établir une cote d'impact global qui est présenté au tableau 1.1. Le détail de la définition de la cote d'impact global est présenté à l'annexe 1.

Tableau 1.1 : Impacts environnementaux des émissions de poussières du site à l'étude

Composante de l'environnement	Description de l'impact environnemental	Type	Étendue	Degré	Durée	Impact global
Eau	Augmentation du pH	-	Local	Léger	Moyen terme	Faible
	Augmentation de l'alcalinité	+	Régional	Léger	Moyen terme	Moyen
	Réduction de la productivité aquatique	+	Régional	Léger	Moyen terme	Moyen
	Modification de la réflexion et de la pénétration de la lumière	+	Régional	Léger	Moyen terme	Moyen
Air	Modification de l'albédo	Indéfini				NA
	Réduction de la concentration en ozone	+	Régional	Léger	Court terme	Faible
	Modification des régimes de précipitation	Indéfini				NA
Sol	Augmentation du pH	+	Régional	Léger	Moyen terme	Moyen
	Durcissement du sol	Indéfini				NA
Humain	Réduction de la visibilité	-	Local	Moyen	Court terme	Faible
	Nuisance	-	Local	Moyen	Court terme	Faible
	Altération de la santé	-	Régional	Léger	Moyen terme	Moyen
	Transport de maladies	-	Régional	Moyen	Court terme	Moyen
Faune	Dommages sur les branchies	-	Local	Moyen	Moyen terme	Moyen
	Altération de la santé	-	Régional	Léger	Moyen terme	Moyen
Flore	Altération des communautés de l'écosystème	-	Local	Moyen	Long terme	Moyen
	Réduction de la productivité des plantes	-	Local	Moyen	Moyen	Moyen
	Augmentation de la productivité des plantes	+	Régional	Léger	Moyen	Moyen
Ressources	Gaspillage de la ressource	-	Local	Total	Long terme	Élevé

La durée représente la période pendant laquelle un impact peut perdurer après l'arrêt de l'émission de poussières. C'est pourquoi les impacts induits par la suspension des poussières dans l'air sont à court terme, alors que les impacts sur l'eau et le sol sont plutôt de moyen terme, considérant que la déposition des poussières depuis plusieurs années continuerait d'avoir des impacts malgré l'arrêt des émissions. Les modifications plus intrinsèques de l'environnement, telles que l'altération des communautés de l'écosystème ou la perte des ressources, sont considérées sur le long terme puisque le renversement de ces situations est plus lent.

La caractérisation qualitative présentée au tableau 1.1 permet d'avoir une idée des composantes de l'environnement qui subissent le plus les impacts des poussières, ainsi que de l'importance relative de ces impacts. On voit qu'il n'y a pas d'impact qui est vraiment très fort, mis à part le gaspillage de la ressource qui est irréversible. On peut aussi observer que plusieurs impacts environnementaux sur les composantes plus primaires de l'environnement (eau, air et sol) sont positifs, alors que les impacts sur les composantes supérieures de l'environnement (humain, faune et flore) sont plutôt négatifs.

De plus, les impacts négatifs se font sentir surtout au niveau local, où la charge de poussières est la plus importante.

Enfin, il faut noter que les impacts environnementaux positifs identifiés sont plutôt associés à l'atténuation d'impacts environnementaux issus d'autres activités (précipitations acides, eutrophisation). Cette approche d'atténuation par ajout d'un agent dans l'environnement (poussières de pierre) est de type « *bout de tuyaux* » (Chevalier, 2010). Dans une approche à long terme, les impacts environnementaux de ces autres activités devraient être traités à la source. Dans cette mesure, les apports en poussières de pierre calcaire risqueraient de modifier l'environnement de façon plus négative. Par exemple, si on élimine les précipitations acides, les apports de poussières feront en sorte d'augmenter le pH de l'environnement, sans contrepartie acide à neutraliser.

2 DESCRIPTION DU SITE À L'ÉTUDE

L'usine de concassage qui est étudiée dans cet ouvrage est située à Saint-Marc-des-Carières, dans la MRC de Portneuf, au Québec. Le site de cette usine a un historique qui remonte à plus de 75 ans, l'exploitation industrielle du gisement de pierre calcaire situé à cet endroit ayant débutée vers 1936 (Graymont (Portneuf), 2011). À travers le temps, diverses installations visant la production de différents types de produits de pierre y ont été installées, certaines étant toujours en fonction, d'autres étant désuètes. Ainsi, outre les installations nécessaires à l'exploitation actuelle de l'usine, on retrouve sur le site plusieurs bâtiments épars, de l'entreposage de vieux équipements ainsi que des produits de pierre plus ou moins transformée datant d'exploitations antérieures. Une carte représentant l'utilisation des superficies du site est présentée à la figure 2.1. Cette carte a été préparée à partir d'une photo aérienne datant du 25 juillet 2002. Les informations relatives à l'utilisation des superficies et aux activités effectuées sur le site ont été confirmées par une visite réalisée le 2 mai 2012.

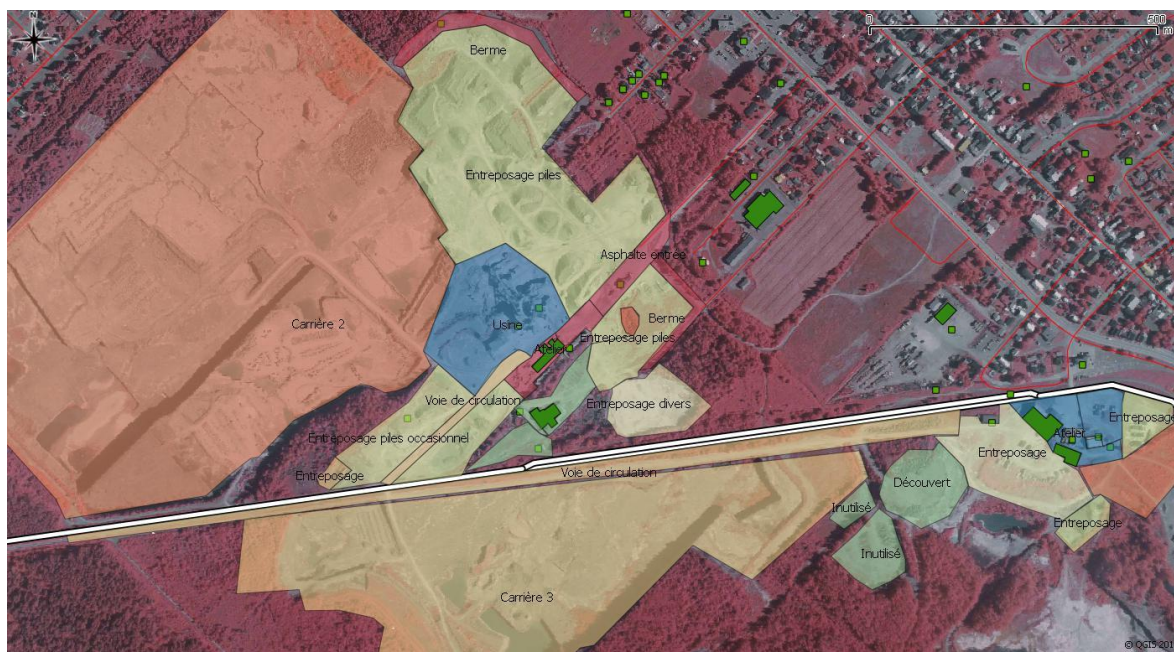


Figure 2.1 : Carte de l'utilisation du site à l'étude
(fait avec Quantum GIS (Licence libre, 2012))

Les émissions de poussières du site à l'étude sont inhérentes aux activités réalisées et aux usages des superficies du site qui sont décrits dans ce chapitre. Les sources d'émission de poussières y sont aussi identifiées, incluant les mesures de réduction des émissions qui sont en place. La caractérisation détaillée de ces sources d'émission de poussières est réalisée au chapitre 3.

2.1 Les carrières et l'extraction de la pierre

Plus de la moitié du site à l'étude est consacrée à l'extraction de la pierre calcaire. Les deux carrières en exploitation ont ensemble une superficie d'environ 65 hectares. L'ensemble de cette superficie est directement sur le roc, avec une faible épaisseur de dépôt d'agrégats et de poussières de pierre provenant des activités du site. On distingue deux types de pierre extraite dans les carrières. Il y a la pierre grise, qui a une forte teneur en carbonate de calcium (CaCO_3), ce qui permet d'en faire des produits d'usage agricole par exemple, et il y a la pierre noire, dont la composition chimique ne permet pas de tels usages. Cette dernière est donc plutôt réservée pour la pierre à construction.

Aussi, dans les deux carrières, on observe deux méthodes différentes d'extraction. Il y a d'abord l'extraction à la scie, qui permet d'extraire des blocs de pierre de très grande taille (plus de un m^3). Ces blocs sont nettoyés, inspectés et entreposés au fond de la carrière, puis ils sont vendus tel quel pour divers usages. Ensuite, il y a la pierre qui est extraite par dynamitage. Pour effectuer le dynamitage, à l'aide d'une foreuse, on perce des trous dans le banc de pierre pour pouvoir y insérer les explosifs et on effectue le dynamitage. Après le dynamitage, cette pierre est ramassée par un chargeur sur roues qui la dépose dans la benne d'un camion lourd qui peut transporter environ 43 TM de pierre à la fois (Dominion enterprises, 2012; Duchesneau, 2012).

2.1.1 Sources de poussières

Les sources d'émissions de poussières provenant des carrières sont les suivantes :

- forage;
- dynamitage;

- dépôt de la pierre dans les camions lourds;
- taille des blocs de pierre avec une scie;
- lavage des blocs de pierre de taille.

2.1.2 Mesure de réduction des émissions de poussières

Une seule mesure concrète est présente pour réduire les émissions de poussières des activités de la carrière, c'est-à-dire la présence de dépoussiéreur sur les foreuses.

2.2 L'usine de concassage et de pierre pulvérisée

L'usine de concassage est située à peu près au centre du site et le sol qui l'entoure est constitué d'agrégat et de poussières provenant des opérations du site. L'usine comprend un point d'entrée pour la pierre brute, trois concasseurs en série qui sont entrecoupés par une dizaine de tamiseurs de différentes tailles et une multitude de convoyeurs qui acheminent la pierre et les produits concassés à travers l'usine. Les produits finis sont acheminés par convoyeurs à leur point de chute final qui peut consister en un silo, un entrepôt avec un toit ou une simple pile extérieure. Ces points de chute finaux se retrouvent un peu partout autour de l'usine. L'usine est ainsi accessible de tous les côtés pour permettre d'aller recueillir les divers produits à leur point de chute final. L'usine de concassage comporte aussi un séchoir à pierre qui est utilisé pour sécher certains produits en hiver.

Une autre section plus ou moins indépendante de l'usine de concassage est le système de pulvérisation de la pierre. Cette section consiste en une gamme de tamis et de séparateurs aériens qui permettent de produire de la pierre très fine (entre 1 μm et 75 μm). Cette section comporte aussi un séchoir à pierre qui est essentiel à l'opération du système ainsi qu'un petit broyeur à marteaux pour la pierre.

2.2.1 Sources de poussières

Les sources d'émissions de poussières provenant de l'usine de concassage et de pierre pulvérisée sont les suivantes :

- points de chute des matériaux;
- concasseurs;
- tamiseurs;
- séchoirs à pierre;
- dépoussiéreurs.

2.2.2 Mesure de réduction des émissions de poussières

Les mesures qui visent à réduire les émissions de poussières des opérations de l'usine de concassage sont diverses. Certaines opérations sont réalisées dans des bâtiments fermés et plusieurs convoyeurs sont couverts. Des dépoussiéreurs sont installés pour recueillir les poussières aux tamiseurs, aux concasseurs et aux points de chute des matériaux. Des jupes sont installées à certains points de chute pour diminuer la hauteur de chute.

2.3 L'entreposage en piles des produits de pierre concassée

Les produits de pierre concassée ne sont pas générés au fur et à mesure des ventes. D'importantes réserves de pierres sont conservées sur le site. C'est pourquoi une superficie considérable d'environ 20 hectares est consacrée à l'entreposage des produits de pierre concassée. Les produits finis sont récupérés par camion ou chargeur sur roues à partir des points de chute finaux pour être ensuite déposés sur les piles réservées à chacun des produits finis. Les lieux d'entreposage sont concentrés principalement à un seul endroit, bien que certaines zones d'entreposage plus ou moins temporaire soient utilisées à d'autres endroits sur le site.

2.3.1 Sources de poussières

Les sources d'émissions de poussières provenant de l'entreposage des piles sont les suivantes :

- déchargement des produits sur les piles;
- chargement des produits pour les clients;
- érosion des piles par le vent.

2.3.2 Mesure de réduction des émissions de poussières

On peut identifier trois mesures visant à réduire les émissions de poussières de l'entreposage en piles des produits. Premièrement, certains produits sont entreposés dans des abris, dont certains sont en pression négative grâce à des dépoussiéreurs. Deuxièmement, deux bermes sont érigées aux limites de propriétés près des entreposages en piles, dans un axe nord-ouest et sud-ouest. Troisièmement, une bonne pratique est implantée quant au chargement des produits très fins avec un chargeur sur roues. Cette pratique consiste à limiter la quantité du produit qui est chargée dans la benne du chargeur sur roues à chaque pelletée, ce qui a pour effet de limiter les pertes.

2.4 Les voies de circulation

Une panoplie de véhicules et équipements mobiles circulent sur le site à l'étude. On y retrouve principalement les huit chargeurs sur roues, les six camions lourds, les 16 camionnettes ainsi que l'ensemble des véhicules des clients qui peuvent atteindre la centaine par jour. Comme l'ensemble des voies de circulation du site sont en agrégat et poussières de pierre, de la poussière est entraînée dans l'air à chaque passage d'un de ces véhicules.

2.4.1 Sources de poussières

Les sources d'émissions de poussières provenant des voies de circulation se résument à la poussière qui est entraînée dans l'atmosphère lors du passage des véhicules pour les activités suivantes :

- transport du découvert de la carrière vers le lieu d'entreposage;
- transport de la pierre de la carrière vers le concassage;
- transport des produits finis de l'usine de concassage vers l'entreposage;
- transport des camions de clients entre la balance et les piles d'entreposage;
- déplacements divers des camionnettes de maintenance, supervision et opération;
- déplacement des chargeurs sur roues.

2.4.2 Mesure de réduction des émissions de poussières

Deux mesures de réduction des émissions de poussières dues à la circulation peuvent être identifiées. D'une part, l'entrée de l'usine a été asphaltée jusqu'à la balance. D'autre part, un camion-citerne applique de l'eau sur les différentes voies de circulation environ deux fois par jour par temps sec.

2.5 La gestion du découvert

Avant de pouvoir dynamiter et exploiter de nouvelles zones de la carrière, il faut enlever la végétation et la terre qui s'y trouve. Le découvert qui est ainsi retiré est transporté par camion et déposé sur le dessus d'une pile pour un entreposage à long terme, en attendant la restauration de la carrière. Tout le découvert qui provient des carrières du site à l'étude est entreposé au même endroit sur une pile de plus de 30 mètres de haut.

2.5.1 Sources de poussières

Les sources d'émissions de poussières provenant de la gestion du découvert sont les suivantes :

- chargement du découvert;
- déchargement du découvert.

2.5.2 Mesure de réduction des émissions de poussières

Aucune mesure particulière n'est prise pour limiter les émissions de poussières de ces sources.

2.6 Autre entreposage et superficie inutilisée

Plusieurs superficies qui sont à nu sur le site servent soit au stationnement d'équipements mobiles, soit à l'entreposage d'autres équipements ou à l'entreposage d'équipements ou de matériaux datant d'activités antérieures. Certaines superficies à nu sont tout simplement inutilisées.

2.6.1 Sources de poussières

On peut identifier une seule source de poussières provenant de telles superficies. Il est question de l'érosion par le vent des superficies à nu.

2.6.2 Mesure de réduction des émissions de poussières

Aucune mesure particulière n'est prise pour limiter les émissions de poussières de ces sources.

3 CARACTÉRISATION DES SOURCES DE POUSSIÈRES

L'ensemble des sources de poussières reliées à l'exploitation de l'usine de concassage a été identifié dans le chapitre 2. Le présent chapitre vise à déterminer l'importance relative de ces sources de poussières les unes par rapport aux autres par l'estimation des quantités de poussières émises par chacune d'elles. Il sera donc d'abord question de la méthodologie du calcul des émissions, puis des résultats de ces calculs.

3.1 Méthodologie du calcul des émissions

Les estimations sont réalisées à l'aide de facteurs d'émission publiés dans le rapport AP-42 de la USEPA (2006a) et, dans une moindre mesure, avec ceux du *Guide pour les carrières et sablière* d'Environnement Canada (2012b). Le rapport de la USEPA définit un facteur d'émission comme étant une valeur qui tente d'exprimer la relation entre un certain paramètre d'une activité et la quantité d'un certain polluant qui est émis par l'activité. Par exemple, un facteur de tonnes de poussières émises dans l'atmosphère par quantité de pierre concassée dans un certain procédé peut être utilisé. Un tel facteur est généralement obtenu en mesurant directement les émissions lors du fonctionnement du procédé, tout en associant ce taux d'émission au taux d'alimentation du procédé au moment de la mesure.

La USEPA (2006a) affirme que dans la majorité des cas, les facteurs d'émission sont des moyennes des meilleures données qui sont disponibles concernant une activité et que celles-ci devraient être représentatives des émissions à long terme du secteur d'activité en question. Malgré cela, il faut s'assurer d'utiliser les bons chiffres pour pouvoir tirer profit de ces facteurs et avoir les meilleures estimations possible. On peut considérer qu'il y a quatre éléments qui doivent être vérifiés adéquatement dans les calculs et ceux-ci sont présentés schématiquement à la figure 3.1.

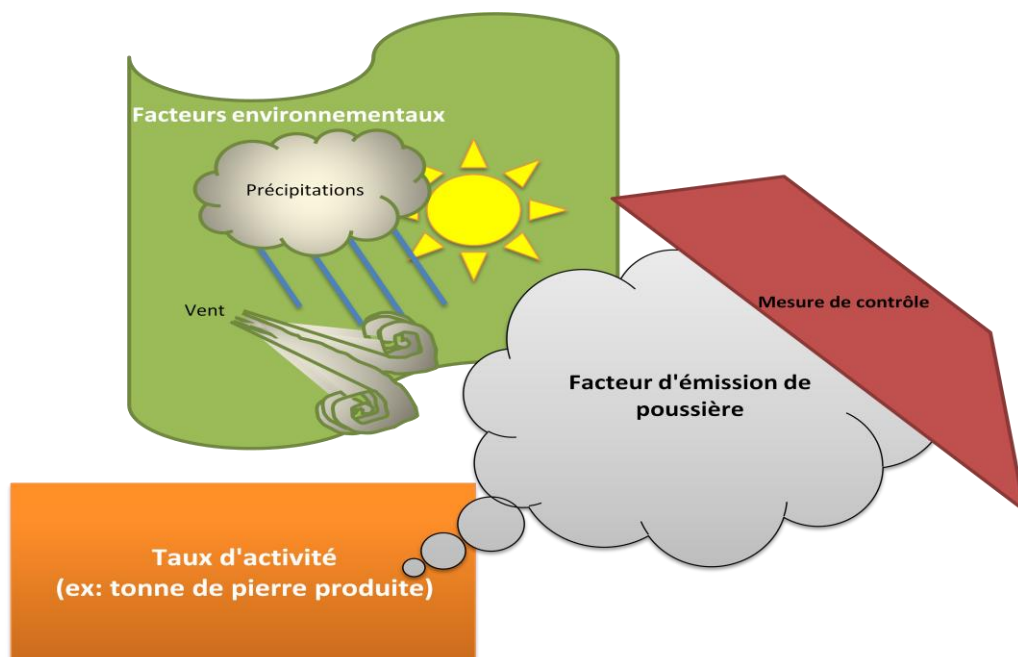


Figure 3.1 : Les quatre éléments de l'estimation des émissions de poussières

Premièrement, il y a l'identification du bon facteur d'émissions, avec la bonne activité à évaluer. Certaines activités peuvent se ressembler, bien qu'elles diffèrent dans leur potentiel d'émission de poussières. De plus, pour certaines d'entre elles, il existe plus d'un facteur d'émission, selon la manière dont l'activité est réalisée, selon les intrants utilisés pour l'activité ou selon les méthodes de contrôle des émissions qui sont en place.

Deuxièmement, il faut s'assurer d'utiliser le bon taux d'activité, c'est-à-dire la bonne valeur du paramètre de l'activité qui doit multiplier le facteur d'émission (ex. : la quantité de pierre concassée). Cette valeur du paramètre est primordiale pour pouvoir estimer à la bonne intensité les émissions reliées à l'activité propre au site.

Troisièmement, il faut choisir adéquatement les mesures de contrôle des émissions et leur efficacité. Les émissions d'une activité réalisée avec une mesure de contrôle qui a une efficacité de 95 % de réduction peut faire toute la différence dans les estimations.

Quatrièmement, il faut être certain de considérer adéquatement les variables environnementales telles que les précipitations, le gel et le vent dans le calcul des émissions, car ces variables ont un effet sur les émissions de poussières. Les données de

précipitation et de vent utilisées pour le calcul des émissions dans ce document proviennent toutes de la station météo de Deschambault, située à 6,5 km du site à l'étude et dont les données sont retrouvées sur le site Internet d'Environnement Canada (2012a).

Le chiffrier électronique qu'utilise Graymont pour estimer les émissions atmosphériques de ses usines de chaux dans le but de les rapporter dans l'Inventaire National des Rejets de Polluants du Canada a été utilisé comme base pour la définition des variables et méthodes à utiliser. Malgré cela, chacun des facteurs d'émission utilisés pour le calcul des émissions de poussières du site à l'étude a été évalué en gardant en tête les quatre éléments à vérifier afin d'assurer que les estimations représentent le mieux les émissions réelles du site. De plus, tous les calculs ont été faits à partir des données de 2011, année de référence la plus récente pour laquelle les données sont disponibles.

Les sous-sections suivantes sont consacrées à la description des méthodes de calcul utilisées ainsi qu'à leur justification pour chacune des sources estimées. Toutes les sources de poussières qui ont été identifiées au chapitre 2 ne sont pas estimées dans ce chapitre, faute de l'existence de facteurs d'émission ou de données fiables sur les opérations du site à l'étude. Ainsi, le forage, le dynamitage, la taille et le lavage de pierre ainsi que la gestion du découvert n'ont pas été inclus dans les calculs.

3.1.1 Procédé de concassage, tamisage, points de chute et pulvérisation de la pierre

Le calcul des émissions de poussières du concassage, du tamisage, des points de chute de matériaux et de la pulvérisation de la pierre est basé sur les facteurs d'émission présentés aux tableaux 11.19.2-1 et 11.19.2-3 du *AP-42* de la USEPA (2006b). Ces facteurs d'émission sont réputés être représentatifs des émissions d'une usine de concassage de pierre calcaire (USEPA, 2006b). La USEPA (2006b) suggère d'ailleurs un schéma de procédé typique du concassage et de la pulvérisation de la pierre qui est présenté à la figure 3.2. Ce schéma de procédé s'accorde avec celui de l'usine de Saint-Marc-des-Carières (Graymont (Portneuf), 2007a; 2007b).

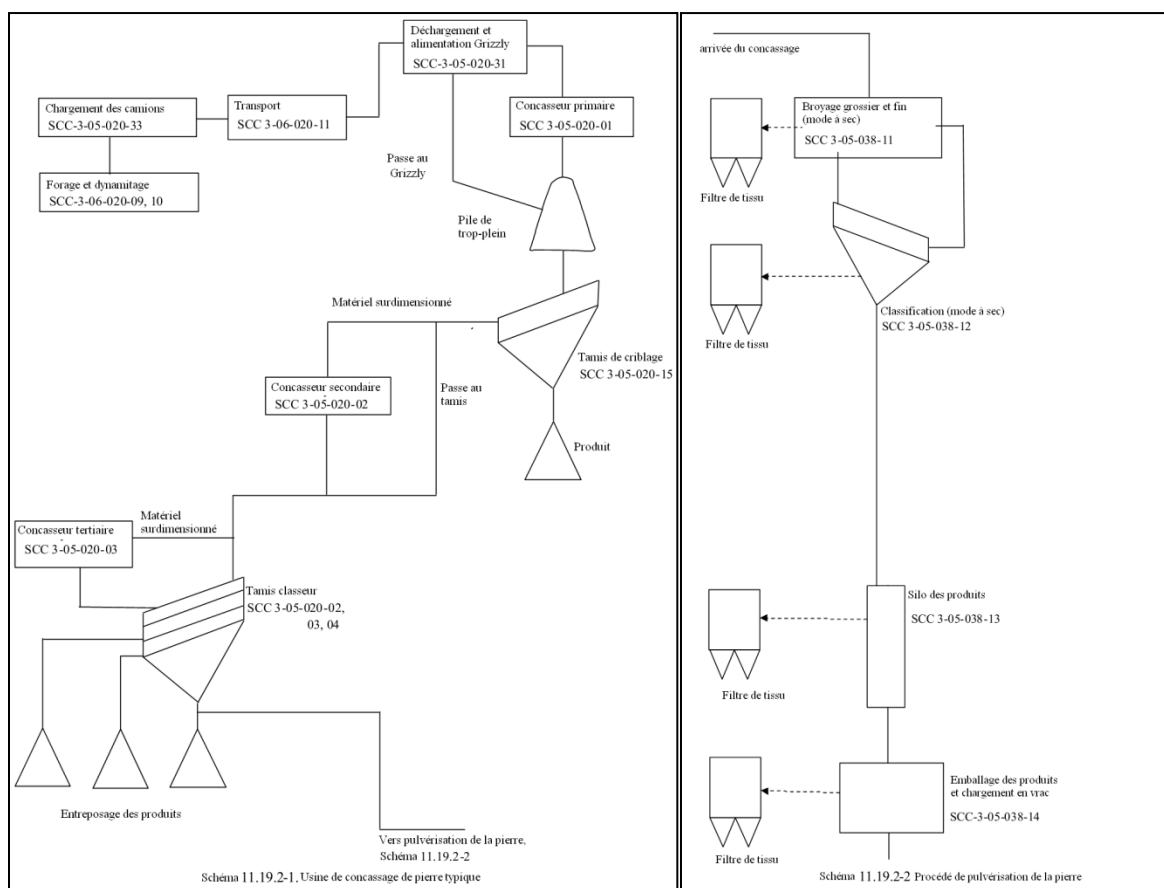


Figure 3.2 : Schéma de procédé typique d'une usine de concassage et de pulvérisation de pierre

(modifié de : USEPA, 2006b, p. 11.19.2-3 et p. 11.19.2-4).

Pour l'application des facteurs d'émission, chacun des points d'émission du procédé a été identifié sur les schémas de procédé de Graymont (Portneuf) (2007a; 2007b). Les facteurs d'émission sont définis sensiblement de la même façon pour le concassage et la pierre pulvérisée, c'est-à-dire que l'on a un facteur d'émission pour chaque concasseur (ou broyeur dans le cas de la pulvérisation) et un facteur d'émission pour chaque tamis (ou filtre en tissu dans le cas de la pulvérisation). Ensuite, il y a un facteur d'émission pour chaque point de transfert des matériaux sur un convoyeur.

Les facteurs d'émission utilisés à cette étape sont exprimés en kilogramme d'émission de poussières par tonne de pierre ayant passé dans le procédé. Il faut donc déterminer les quantités de pierre qui sont passées par chacune des étapes du procédé. Ce détail

d'information n'était pas disponible, seules les quantités totales de pierres entrées dans le système de concassage et dans le système de pierre pulvérisée ainsi que la quantité produite de chacun des produits finis étaient disponibles. Ainsi, l'élaboration de certaines hypothèses a été nécessaire afin d'appliquer les facteurs d'émissions à ces différentes quantités.

Pour la pierre concassée, il a été déterminé que le concasseur primaire et les tamis qui le suivent reçoivent 100 % de la pierre qui est acheminée à l'usine. Pour ce qui est du concassage secondaire, il a été déterminé que c'est 75 % de la pierre qui y passe, ainsi que dans les tamis qui le suivent, alors que c'est 50 % pour la pierre qui passe dans le concasseur tertiaire et dans les tamis qui le suivent. Pour ce qui est de la pierre pulvérisée, il n'y a qu'un broyeur qui est réputé recevoir 100 % de la pierre pulvérisée, puis il y a un premier tamis qui reçoit aussi 100 % de la pierre. Ensuite, il a été déterminé que les sept filtres en tissus qui suivent recevaient chacun un sixième de la pierre pulvérisée totale. Ces estimations ont été utilisées puisqu'il était impossible de savoir exactement quelle proportion de la pierre passait à travers chacune des étapes du procédé, mais qu'il semblait invraisemblable d'utiliser les quantités totales de pierre entrées dans le système, tel qu'il était suggéré dans le chiffrier utilisé par Graymont pour les déclarations à l'Inventaire National des Rejets de Polluants.

Pour les points de chute, autant du côté de la pierre pulvérisée que du concassage, un chemin théorique qu'emprunterait une pierre a été déterminé, de sorte que cette pierre passerait à travers chacun des tamis qu'elle rencontre. Pour la pierre concassée, cela résulte donc à ce que la pierre passe par 12 points de transfert, excluant la chute de la pierre brute dans l'alimentation primaire du concassage, qui est calculée selon une autre formule à la sous-section 3.1.4. Pour la pierre pulvérisée, on retrouve 11 points de transfert pour un tel cheminement de la pierre. Ainsi, l'ensemble de la quantité de pierre concassée a été multiplié par les facteurs d'émission associés à chacun des points de transfert et la même chose a été réalisée pour la pierre pulvérisée.

La chute de chacun des produits à leur destination finale dans le procédé de concassage a été calculée à part, puisque la quantité produite de chacun des produits était connue. De

cette façon, un point de transfert a été associé à chacun des produits et le facteur d'émissions associé a été multiplié par la quantité de produits correspondante.

Ensuite, pour chacun des points d'émission, l'efficacité du contrôle a été déterminée. Grâce au schéma de procédé de Graymont (Portneuf) (2007a; 2007b), il a pu être déterminé que la majorité des sources d'émission étaient reliées à un système de dépoussiérage à sec dont l'efficacité est estimée à 95 % de réduction selon Environnement Canada (2012b). Les sources d'émissions qui comportaient une méthode de contrôle différente étaient le concassage primaire, qui est dans une enceinte partielle (efficacité de 85 %), le tamisage humide (efficacité incluse dans le facteur d'émission) et la pierre pulvérisée (efficacité incluse dans les facteurs d'émission). Aussi, quatre points de chute des produits à leur destination finale ont été considérés comme n'ayant aucun contrôle des émissions, en accord avec les informations transmises par Tessier (2012).

Enfin, pour les points d'émissions concernées par cette sous-section, les facteurs environnementaux (vent, précipitations) n'ont pas été considérés, puisque les facteurs d'émission disponibles ne les incluaient pas.

3.1.2 Séchoirs à pierre

Aucun facteur d'émission n'était disponible pour les émissions d'un séchoir à pierre. Il a donc été déterminé d'utiliser les facteurs d'émission des séchoirs à sable et gravier présentés au tableau 11.19.1-1 du *AP-42* de la USEPA (2006c). Ces facteurs sont exprimés en kilogramme d'émission de poussières par tonne de pierre ayant passé dans le séchoir. Ainsi, il a fallu déterminer la quantité de pierre passant dans chacun des deux séchoirs à pierre de l'usine à l'étude. Le séchoir numéro 1 sert à sécher la pierre avant son entrée dans le système de pulvérisation de la pierre. Ainsi, il a été considéré que 100 % de la pierre qui a été pulvérisée est passée par ce séchoir. Pour le séchoir numéro 2, la quantité de pierre qu'il a séchée était connue, elle a donc été utilisée.

Les facteurs d'émission pour les séchoirs à pierre considèrent les méthodes de contrôle des émissions. Ainsi, le facteur d'émission utilisé pour le séchoir 1 est celui d'un séchoir

avec un dépoussiéreur à sec, alors que le facteur d'émission du séchoir 2 est celui d'un séchoir sans aucun mode de contrôle.

Enfin, les facteurs environnementaux (vent, précipitations) n'ont pas été considérés puisque les facteurs d'émission disponibles pour les séchoirs ne les incluaient pas.

3.1.3 Dépoussiéreurs

Bien que les dépoussiéreurs soient destinés à limiter les émissions des autres sources, ceux-ci émettent tout de même des poussières. Ce sont soit de très fines particules qui passent à travers les filtres, soit des particules qui passent à travers des imperfections du système. Les facteurs d'émission utilisés pour ces sources proviennent du Ministry of the Environment of Ontario (2009) et ils sont exprimés en kilogramme de particules émises par m³ de gaz émis des dépoussiéreurs. Ainsi, il fallait connaître le débit des dépoussiéreurs et leurs heures de fonctionnement pour utiliser ces facteurs d'émission. Les spécifications des dépoussiéreurs étaient connues et leurs heures d'opération ont été déterminées comme étant les mêmes que les heures de production des équipements de concassage qui étaient connues. Les émissions des dépoussiéreurs de la pulvérisation de la pierre n'ont pas été calculées puisqu'elles étaient incluses dans le facteur d'émission du procédé.

3.1.4 Manutention des matériaux par chargeur sur roues (pierre brute et produits finis)

La pierre qui entre au début du procédé de concassage est déchargée par camion à l'air libre. Après avoir traversé le procédé, les matériaux arrivés à leur point de chute final sont transportés par chargeur sur roues ou par camion vers des piles d'entreposage où ils sont déchargés. De plus, de ces piles, les camions des clients sont remplis à l'aide de chargeurs sur roues. Les émissions de ces points de déchargement de matériaux sont calculées à l'aide des facteurs d'émission calculés avec l'équation 1 de la section 13.2.4 de l'AP-42 (USEPA, 2006d). Cette équation permet au facteur d'émission de refléter les conditions de vent qui prévalent sur le site ainsi que l'humidité attendue des matériaux manipulés. Le facteur d'émission obtenu doit être multiplié par la quantité de matériau qui

a été manipulée. Ainsi, la pierre brute entrée dans le concassage, la production de chaque produit et les quantités vendues de chaque produit ont été utilisées pour calculer les émissions de leur manutention. Aucune mesure de contrôle des émissions n'a été considérée pour ces activités.

3.1.5 Voies de circulation

Les véhicules et équipements mobiles qui circulent sur le site à l'étude entraînent la poussière qui est sur les voies dans l'atmosphère. L'estimation de l'émission de poussières par ces sources s'est effectuée à l'aide de l'équation 1a du chapitre 13.2.2 de l'AP-42 de la USEPA (2006e). Cette équation établit un facteur de quantité de poussières par distance parcourue par les véhicules sur les routes non asphaltées. Il a donc fallu déterminer ces distances, ce qui n'est pas évident pour les véhicules qui n'ont pas de trajets précis. C'est pour cela que les camionnettes et les chargeurs sur roues ont été exclus du calcul.

Ainsi, seuls les camions lourds qui sont utilisés pour le transport de la pierre brute de la carrière vers l'usine et les camions des clients qui viennent chercher les produits ont été considérés. Pour ce faire, un trajet a été déterminé pour l'aller-retour entre la carrière et l'usine. Afin d'obtenir la distance totale parcourue, cette distance d'aller-retour a été multipliée par le nombre de voyages de pierre réalisés dans l'année, valeur qui est obtenue en divisant la production totale de pierre brute par la capacité de transport des camions lourds (43 TM (Dominion enterprises, 2012; Duchesneau, 2012)). Pour ce qui est des camions des clients, le trajet typique d'entrée sur le site, de passage à la balance, d'aller vers les piles pour le chargement puis de retour vers la balance a été considéré. Pour connaître le nombre de voyages, les quantités totales de ventes de pierre ont été divisées par la capacité typique des camions de clients, qui est de 23 TM (Duchesneau, 2012; Mack Trucks inc., 2012).

L'équation utilisée permettait aussi de considérer le contrôle des émissions par l'arrosage 8 mois par année, en plus des précipitations, de la couverture de neige et du vent. Enfin, le calcul du facteur d'émission considère aussi le contenu en silt des voies de circulation

(8,3 %), valeur qui a été obtenue de l'AP-42, qui rapporte des valeurs moyennes pour les carrières de pierre calcaire (USEPA, 2006e).

3.1.6 Entreposage en piles et surfaces érodables

L'équation 8.11 du *Guide pour les carrières et sablières* d'Environnement Canada (2012b) a été utilisée pour le calcul des émissions de poussières dues à l'érosion des surfaces par le vent. Cette équation permet de considérer la teneur en silt des surfaces, ce qui est une valeur moyenne pour les surfaces de pierre calcaire (0,5 % (Environnement Canada, 2012b)). Le principe de ce facteur d'émission est fondé sur la vitesse nécessaire à une particule pour être projetée dans l'atmosphère. Cette vitesse est acquise par le vent et est limitée par les précipitations. Ainsi, l'équation du facteur d'émission considère les précipitations et les périodes où le vent est supérieur à 19,5 km/h (Environnement Canada, 2012b).

Le facteur d'émission obtenu grâce à l'équation 8.11 est exprimé en quantité de poussières émise par superficie érodable. Il a donc fallu déterminer les superficies érodables sur le site à l'étude. La superficie des piles a été calculée selon leur forme pyramidale. Pour ce faire, leur volume et hauteur a été utilisée, obtenu du rapport d'arpentage annuel réalisé par Graymont pour ses inventaires (Géo Topo, 2011). Pour déterminer les autres superficies érodables, une première délimitation a été faite dans le logiciel Quantum GIS (Licence libre, 2012) à partir d'une photo aérienne du site datant de 2002. Une visite de terrain a été réalisée le 2 mai 2012 pour confirmer les superficies érodables. Le calcul des superficies s'est ensuite fait à l'aide du logiciel Quantum GIS (Licence libre, 2012).

Pour les deux produits entreposés en piles dans des entrepôts fermés, une efficacité de 50 % de la méthode de contrôle des émissions a été appliquée (Environnement Canada, 2012b). Pour les superficies occupées par les carrières, considérant le fait que le plancher de ces carrières est très inférieur au niveau du sol, il est à prévoir que les périodes de temps où le vent est supérieur à 19,5 km/h soient moins fréquentes qu'au niveau de la station météorologique de Deschambault. C'est pourquoi seulement 50 % de la superficie occupée par les deux carrières a été considérée dans les calculs.

3.2 Résultats du calcul des émissions de poussières

Les émissions de poussières du site à l'étude pour l'année 2011 sont présentées sur une base relative à la figure 3.3. Le détail des émissions sur une base absolue est présenté à l'annexe 2. Les émissions totales ont été de 78 TM de TPM, de 33 TM de PM_{10} et de 9 TM de $PM_{2,5}$. Ainsi, 42 % des émissions totales sont des particules de moins de $10\ \mu m$, alors que 11 % en sont de moins de $2,5\ \mu m$. Ces résultats représentent la meilleure estimation disponible pour les émissions de poussières des installations, en considérant que tous les équipements, incluant les dépoussiéreurs, étaient en bon état de fonctionnement.

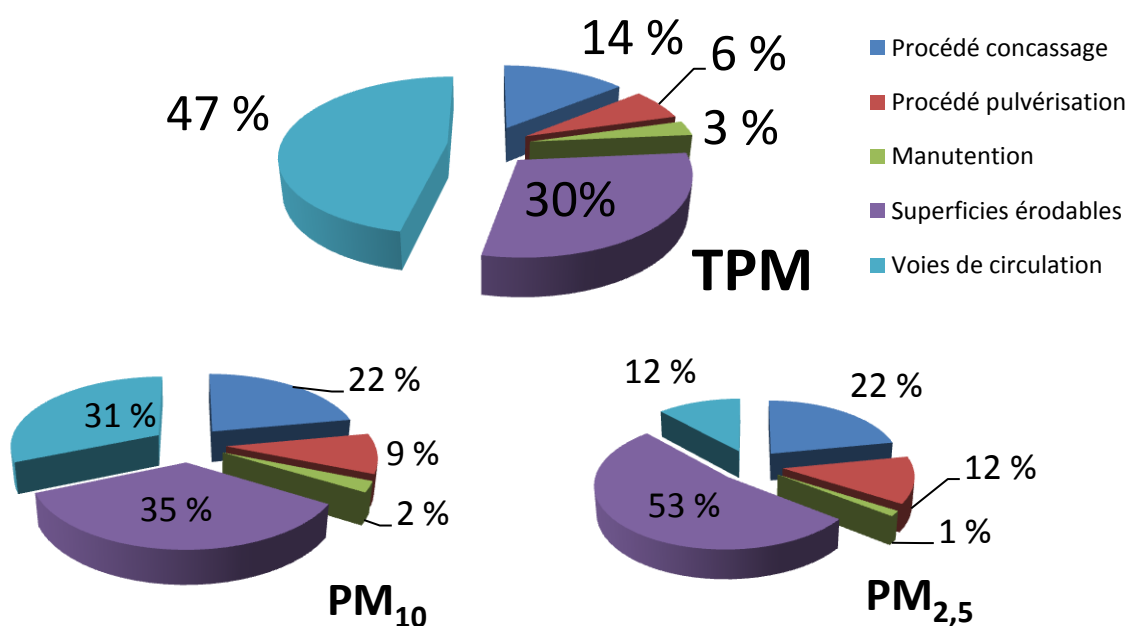


Figure 3.3 : Répartition de l'importance des émissions de poussières selon les activités sur le site à l'étude

On remarque donc que les plus importantes sources d'émissions de poussières sont le passage des équipements mobiles sur les voies de circulation (47 % des TPM) et les émissions des surfaces érodables (30 % des TPM), et ce, malgré le fait que seuls les camions lourds ont été considérés pour les émissions des voies de circulation. On peut attribuer ces résultats à deux facteurs. D'une part, comme ces deux sources d'émission ne sont pas associées à un point précisément identifiable sur le site (sources diffuses), il est

plus difficile de contrôler ces émissions que celles d'un point fixe où on peut installer un dépoussiéreur par exemple. D'autre part, la très grande superficie du site à l'étude, qui est du sol nu, fait en sorte que les émissions de poussières attribuables aux superficies érodables sont importantes. Considérant que le facteur d'émission pour cette source prenait comme base les rafales que subit la station météorologique de Deschambault, ce facteur ne considère pas les barrières éoliennes existantes sur le site (arbres, bâtiments et bermes). On peut donc s'attendre à ce que ces émissions soient surestimées. Par contre, comme ces émissions comptent tout de même pour 30 % des émissions totales, il est difficile de croire qu'elles sont surestimées au point d'être en réalité négligeables. De plus, on peut voir que pour les plus petites particules, cette proportion passe à 35 % (PM_{10}) et à 53 % ($PM_{2,5}$). Cela est attribuable au fait que les émissions dues aux superficies érodables sont causées par le vent et que le vent propulse les particules les plus petites dans l'atmosphère, les plus grandes étant trop lourdes pour être entraînées. Notons que cela n'est pas le cas pour les émissions dues à la circulation des équipements mobiles, puisque ceux-ci provoquent suffisamment de turbulence pour entraîner les plus grosses particules.

La source d'émission suivante, en termes d'importance, est le procédé de concassage, qui représente 14 % des émissions de TPM. Cette proportion monte à 22 % pour les PM_{10} et les $PM_{2,5}$. Comme cette source est constituée de plusieurs composantes, le détail de l'importance relative de ces composantes est présenté à la figure 3.4, alors que les valeurs absolues sont présentées à l'annexe 3.

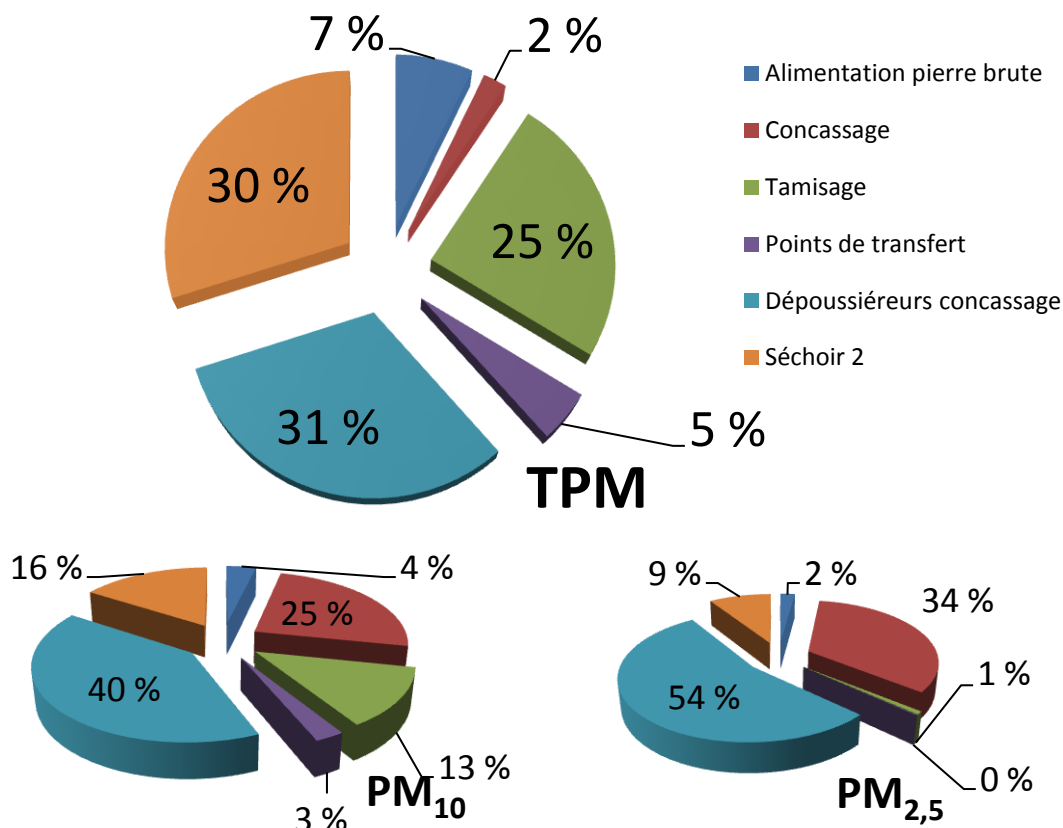


Figure 3.4 : Répartition de l'importance des émissions de poussières du procédé de concassage de la pierre selon ses différentes composantes

D'emblée, on voit que le séchoir 2 représente 30 % des émissions de TPM, malgré le fait qu'il ne reçoive que 1 % de la pierre totale concassée à l'usine. Ce séchoir ne comporte pas de dépoussiéreur, ce qui est la raison de cette production importante de poussières.

Ensuite, on observe que les émissions des dépoussiéreurs sont proportionnellement les plus importantes de toutes. Cette proportion s'élève même à plus de la moitié pour les PM_{2,5}. Les dépoussiéreurs émettent beaucoup de poussières, mais ils ont tout de même leur utilité. Comme le montre le tableau 3.1, les dépoussiéreurs permettent de réduire les émissions de TPM de 87 % pour le procédé de concassage, en excluant le séchoir 2 qui n'est pas dépoussiéré. La contrepartie de cette réduction est que l'on augmente les émissions de PM_{2,5}.

Tableau 3.1 : Effet des dépoussiéreurs sur les émissions du procédé de concassage (excluant le séchoir 2 non dépoussiéré)

	Émissions (TM)		
	TPM	PM ₁₀	PM _{2,5}
Sans dépoussiérage	59	22	1
Avec dépoussiérage	8	6	2
Différence	-87 %	-72 %	+43 %

Aussi, bien qu'ils soient dépoussiérés, les tamis représentent tout de même le quart des émissions de TPM. Il semble qu'à l'exception du séchage de la pierre, le tamisage soit l'étape du procédé de concassage qui émette le plus de poussières.

Le procédé de pulvérisation ne représente que 6 % des émissions de TPM, mais cette source gagne en importance lorsque l'on considère les plus petites particules (9 % des PM₁₀ et 12 % des PM_{2,5}). Cette source apporte donc une importante contribution aux particules de plus petit diamètre, ce qui reflète la nature du procédé qui se veut de générer de la pierre de très faible dimension.

La manutention des produits émet des poussières dans une moindre mesure que les autres sources. Mais cette source a potentiellement été sous-estimée puisque seules les activités de déchargement essentielles au procédé ont été considérées, alors que dans les faits, on va manipuler les matériaux plus de fois que ce qui a été considéré. Par exemple, pour mettre en pile des matériaux, on va parfois utiliser un convoyeur mobile. Pour ce faire, un camion décharge les matériaux à côté du convoyeur, puis un chargeur prend ces matériaux et les décharge dans le convoyeur qui, à son tour, décharge les matériaux sur la pile. On a donc trois déchargements alors que, pour le calcul, seulement un déchargement a été considéré. Les émissions de poussières de la manutention des matériaux sont donc les moins importantes des sources estimées, mais elles pourraient être plus importantes que ce qui est rapporté.

Ces résultats montrent donc que le bon fonctionnement continu des dépoussiéreurs est un incontournable pour la réduction des émissions de poussières du site à l'étude. La contrepartie de l'utilisation de ces dépoussiéreurs est une augmentation des émissions de PM_{2,5}. De plus, l'installation d'un dépoussiéreur sur le séchoir 2 semble aussi un incontournable pour le procédé de concassage. En outre, les résultats laissent entrevoir

que les sources d'émission de poussières qui ont le plus de potentiel de réduction sont les émissions de la circulation sur les voies et les superficies érodables. Il faudra par contre vérifier si ce potentiel est techniquement et économiquement possible, ce qui sera fait dans le chapitre 4.

4 SOLUTIONS DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES DES PRINCIPALES SOURCES

Dans le chapitre 2, les différentes sources de poussières du site à l'étude ont été identifiées, en incluant les mesures de réduction des émissions de poussières qui sont déjà en place. Ensuite, le chapitre 3 a permis de déterminer que les voies de circulation et les superficies érodables étaient les sources de poussières les plus importantes. Les seules mesures de réduction présentement utilisées pour ces sources sont l'arrosage des voies avec de l'eau ainsi que l'asphaltage de l'entrée de l'usine. Le présent chapitre vise à recenser les mesures de réductions de ces sources de poussières et de déterminer quelles sont les meilleures solutions applicables au site à l'étude. Le chapitre décrit donc les mesures de réduction qui ont été recensées en précisant leur efficacité, les aspects environnementaux de leur utilisation et les aspects techniques et économiques de leur implantation et de leur opération.

Le tableau 4.1 présente les paramètres qui influencent la mise en suspension de particules à partir du sol d'après les données de Goudie et Middleton (2006a). Les mesures de réduction des émissions de poussières potentielles devraient donc agir sur l'un de ces paramètres.

Tableau 4.1 : Facteurs influençant les émissions de particules à partir du sol

Climat	Sol	Végétation	Forme du terrain
Vitesse du vent (+)	Type de sol	Type	Uniformité
	Structure du sol		
Direction du vent	Taille des grains	Couverture (-)	Pente (-)
Turbulence (+)	Matière organique (-)		Coupes franches
Précipitation (-)	Carbonate de calcium (-)		
Évaporation (+)	Densité apparente		
Gel et dégel (-)	Cohésion du sol (-)		
	Humidité du sol (-)		

Les signes entre parenthèses indiquent si l'augmentation d'un facteur fait en sorte que les émissions sont plus grandes (+) ou plus faibles (-) (modifié de Goudie et Middleton, 2006a, p. 20)

4.1 Arrosage avec de l'eau

L'arrosage avec de l'eau agit sur l'humidité du sol. En augmentant l'humidité du sol, les particules se retrouvent couvertes d'eau, ce qui les alourdi et les empêche d'être entraînées dans l'atmosphère (Environnement carrières et matériaux (ENCENM), 2011). Cette technique de contrôle des poussières est déjà implantée sur le site à l'étude, où un camion d'eau circule en permanence pour arroser les voies de circulation. On pourrait par ailleurs appliquer cette méthode autant pour les voies de circulation que pour les piles de matériaux et autres superficies érodables.

4.1.1 Efficacité de réduction des émissions de poussières

La technique d'arrosage avec de l'eau peut être plus ou moins efficace selon le taux d'application d'eau (i.e. quantité d'eau par application) et la fréquence des applications. De plus, un certain taux et une certaine fréquence d'application ne garantissent pas l'efficacité d'un traitement, puisque le taux d'évaporation spécifique à un site fait en sorte d'éliminer plus ou moins rapidement l'eau ayant été appliquée. Dans les diverses études consultées, les taux d'efficacité de réduction des émissions de poussières variaient entre 10 et 75 %, avec un intervalle d'une demi-heure à cinq heures entre les applications (New-Zealand Ministry for the Environment, 2001; National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2003; USEPA, 1987; USEPA, 2006e; Western Regional Air Partnership (WRAP), 2006).

La relation entre l'humidité du sol et l'efficacité de réduction des poussières peut être représentée par la figure 4.1. On y observe qu'afin d'atteindre 75 % d'efficacité, il faut que la quantité totale d'eau soit à peu près égale à deux fois l'eau hygroscopique, c'est-à-dire qu'il faut que la masse d'eau du sol traité contienne le double d'eau de ce qui est contenu dans le sol non traité relativement sec (WRAP, 2006). Au-delà de cette quantité, les gains en réduction de poussières sont beaucoup moins importants, ce qui peut s'avérer un gaspillage d'eau. Par contre, on peut appliquer de l'eau au-delà de cette valeur afin de pouvoir réduire la fréquence entre les applications, tout en s'assurant de conserver une efficacité de réduction de 75 % en tout temps. Il faut alors faire attention à une application excessive d'eau, pour éviter la formation de boue qui favorise l'apparition de nids de

poules et d'ornières, ce qui nécessite un entretien plus fréquent des voies de circulation (ENCEM, 2011). De plus, le sol peut être incapable de prendre trop d'eau en une seule application, l'eau en excès ruissellera alors à l'extérieur de la zone où on désire l'appliquer. Le taux idéal d'application d'eau devrait alors assurer que la quantité d'eau présente dans le sol se situe aux alentours du double de l'eau hygroscopique ou plus, tout en ne dépassant pas le taux d'humidité où le sol devient boueux.

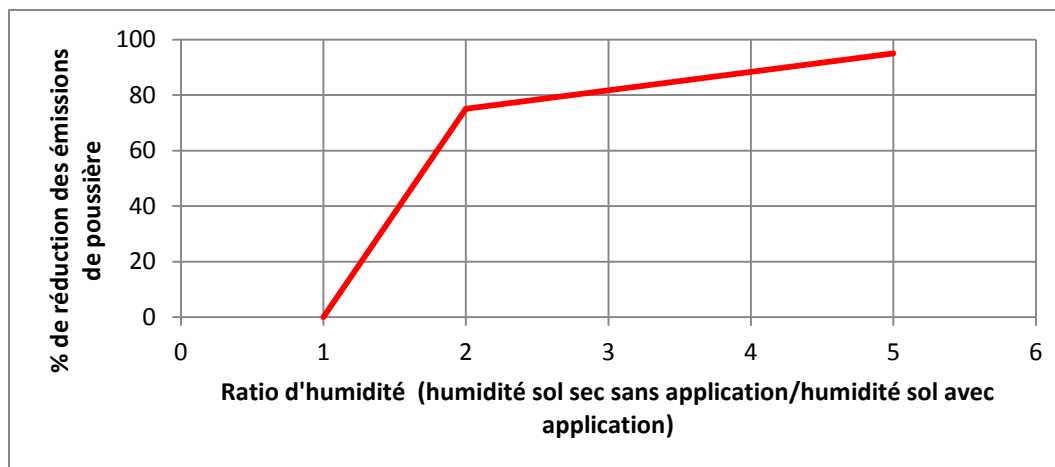


Figure 4.1 : Efficacité de réduction des émissions de poussières de l'application d'eau en fonction du ratio d'humidité du sol

(adapté de : USEPA, 2006e, p. 13.2.2-12)

Le temps maximal entre les applications dépend du taux auquel l'eau s'évapore. Le principe est qu'il faut remplacer l'eau pour maintenir le taux d'humidité du sol nécessaire à conserver l'efficacité du traitement. La teneur en eau hygroscopique dans les sols du site à l'étude n'est pas connue. La USEPA (2006e) recommande de la mesurer afin de déterminer exactement la quantité idéale d'eau à ajouter. Saarenketo (1998) a mesuré une teneur en eau hygroscopique de 4 % (V/V) dans un sol minéral calcaire qui peut s'apparenter à ce que l'on retrouve à la surface du sol du site à l'étude. Ainsi, en considérant qu'il faut humidifier le sol à environ 2 cm de profondeur (Edvardsson *et al.*, 2012), on peut estimer que l'eau hygroscopique du sol du site à l'étude est de 0,8 L/m². On obtient donc une humidité minimale de 1,6 L/m² pour une efficacité de contrôle de 75 %, ce qui nécessite un taux d'application de 0,8 L/m². Il faut de plus considérer appliquer une quantité d'eau supplémentaire pour faire durer l'efficacité. La quantité

maximale d'eau possible à appliquer est hypothétiquement établie à 2 L/m², ce qui serait l'humidité maximale pour éviter la formation de boue. Cette valeur maximale permet donc un excédant de 0,4 L/m² d'humidité par rapport au minimum nécessaire. On peut donc calculer la fréquence nécessaire d'application d'eau en considérant le taux d'évaporation mensuel du site. Ces données mensuelles d'évaporation sont obtenues du modèle climatique MRCC V4.2 (simulation aet) et ont été générées et fournies par l'équipe Simulations climatiques d'Ouranos, via la page Web de distribution de données du Consortium sur la Climatologie Régionale et l'adaptation aux Changements Climatiques (Music et Caya, 2007). Un résumé des données utilisées incluant les taux et fréquences d'application d'eau résultants est présenté au tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Estimation des taux et fréquences d'application d'eau nécessaire à la réduction des poussières sur le site à l'étude

Mois	Taux d'évaporation (L/m ² *h)	Taux 1 ^{re} application (L/m ²)	Temps entre applications (h)	Taux autres applications (L/m ²)
Mai	0,11	1,2	4	0,4
Juin	0,21	1,2	2	0,4
Juillet	0,24	1,2	2	0,4
Août	0,21	1,2	2	0,4
Septembre	0,11	1,2	4	0,4

Les données présentées permettent d'établir qu'en débutant avec un sol sec, si on veut maintenir l'efficacité de façon très stricte, il faut que la première application d'eau se fasse à un taux plus important que les subséquentes. La logique décrite pour déterminer les taux et fréquences d'application d'eau peut servir d'indicatif pour planifier et rendre plus efficace l'utilisation de l'eau sur le site à l'étude. Tel que le recommande la USEPA (2006e), il faudrait à cet effet utiliser les teneurs en eau hygroscopiques mesurées sur le site ainsi que les teneurs maximales qui évitent la formation de boue. L'eau hygroscopique peut être mesurée en utilisant la méthode d'échantillonnage et d'analyse présentée par la USEPA (2006f; 2006g), alors que l'eau maximale à appliquer peut être déterminée directement sur le site en faisant des tests d'application d'eau à différents taux. Le taux d'application peut donc être défini quelque part entre ce qui permet d'atteindre le double de l'eau hygroscopique et le maximum d'humidité. Il ne reste alors qu'à déterminer la fréquence des applications en fonction de l'évaporation. Les taux d'évaporation présentés

dans ce document peuvent être utilisés, mais il faut garder en tête que la circulation des véhicules sur les voies augmente l'évaporation en favorisant la circulation de l'air (USEPA, 2006e). Comme les données présentées ne considèrent que l'évaporation naturelle, il est probable que les intervalles réels entre les applications doivent être plus courts lorsque l'application se fait sur des voies de circulation. La méthode de détermination des fréquences et taux d'application réels qui est décrite peut donc être utilisée pour le site à l'étude afin d'établir un plan d'application d'eau qui est préventif plutôt que réactif à l'observation de poussières.

4.1.2 Aspects environnementaux

Un impact environnemental de l'utilisation de l'eau comme abat-poussière est la consommation d'eau en soi. On peut évaluer l'impact en fonction de la source d'eau. Sur le site à l'étude, l'eau provient du pompage qui est réalisé pour assécher la carrière afin d'y travailler. Cet impact de l'assèchement de la carrière est plutôt inhérent à l'exploitation de la carrière qu'à l'utilisation d'eau comme abat-poussière. Ainsi, l'impact environnemental supplémentaire de détourner cette eau du point de rejet habituel est relativement faible. Par contre, il faut s'assurer d'avoir suffisamment d'eau à pomper en été pour éviter de devoir utiliser l'eau d'une autre source. S'il advenait qu'on utilise l'eau de consommation humaine au lieu de l'eau de la carrière, l'impact serait tout autre. Il comprendrait le gaspillage de ressources pour le traitement et le transport de l'eau, en plus d'occasionner un déficit d'eau supplémentaire à l'endroit de la prise d'eau municipale.

Un autre impact peut subvenir si l'application d'eau est excessive, car elle risque d'entraîner du ruissellement qui pourrait se retrouver dans des plans d'eau environnants et nuire à la qualité de leur eau.

Le principal impact environnemental identifié est applicable seulement si l'arrosage avec de l'eau se fait à l'aide d'un camion-citerne. Le carburant consommé par le camion lors des fréquentes applications nécessaires occasionne divers impacts environnementaux. Cela représente des émissions de gaz à effet de serre ainsi que d'autres aspects reliés à l'extraction du pétrole.

4.1.3 Aspects techno-économiques

L'application d'eau afin d'abattre les poussières peut se faire à l'aide d'un camion-citerne muni de buses d'aspersion, comme il est actuellement réalisé sur le site à l'étude. Cette méthode est bien adaptée pour les voies de circulation temporaires, peu fréquentées ou isolées. L'application par buse d'aspersion fixe est aussi possible (ex. : voir figure 4.2). Cette méthode est parfaite pour les voies de circulation permanentes, les zones d'empilement de matériau ainsi que les autres surfaces sujettes à l'érosion par le vent. Ces structures peuvent par contre s'avérer encombrantes dans certaines situations. (ENCEM, 2011)



Figure 4.2 : Aspersion des voies de circulation par buses fixes
(tiré de : ENCEM, 2011, p. 68)

Les coûts associés à l'utilisation d'un camion pour l'arrosage se distribuent entre l'immobilisation, l'opération (salaire et carburant) et l'entretien du camion. Pour ce qui est des buses d'aspersion fixes, les coûts comprennent l'immobilisation, l'installation et l'entretien du système. De façon générale, lorsqu'il est possible d'utiliser un système d'aspersion fixe, ce système est moins dispendieux. Cela s'explique par le fait qu'il ne nécessite pas la mobilisation d'un employé comme c'est le cas pour l'opérateur du camion-citerne. Il faut par contre s'assurer que le système a un contrôle automatique ou à distance et que les taux d'application d'eau sont réglés efficacement. Les coûts d'un

système fixe dépendent de la surface à humidifier et de la localisation par rapport à une source d'eau. (*Ibid*)

Les coûts associés à un système fixe n'ont pas été évalués, faute de données réalistes. Pour ce qui est de l'utilisation d'un camion-citerne, le tableau 4.3 présente un résumé des coûts associés à son utilisation sur le site à l'étude.

Tableau 4.3 : Coûts d'immobilisation et récurrents pour l'utilisation d'un camion-citerne pour humidifier les routes du site à l'étude

Type de coût	Coût (\$/an)
Coût d'immobilisation (amorti sur 10 ans)	10 000
Coût d'opération	36 000
Coût d'entretien	9000
Total	55 000

(inspiré de Graymont, 2012b)

On observe qu'effectivement, les coûts d'opération (salaire et carburant) sont ceux qui contribuent le plus à la facture du système. Il pourrait donc être pertinent de vérifier la possibilité d'utiliser un système d'aspersion fixe sur le site. Par contre, le site à l'étude possède déjà un camion-citerne fonctionnel. L'installation d'asperseurs fixes pourrait être utilisée en complémentarité pour libérer le camion-citerne afin qu'il concentre ses activités sur certaines zones, ce qui augmenterait l'efficacité de contrôle des émissions de poussières.

Une autre option d'amélioration d'efficacité est proposée par Gambatese *et al.* (2001) et consiste à installer des buses d'aspersion sur des camions de transport qui circulent fréquemment sur le site. Cette alternative pourrait être envisagée, mais elle exige des modifications aux camions et il faut penser à l'alimentation en eau pour le ravitaillement des camions.

4.2 Abat-poussières chimiques

Il existe une gamme de substances qui peuvent être étendues sur les chaussées de routes non asphaltées ou sur les surfaces à nu dans le but de limiter les émissions de

poussières. Par le passé, les huiles usées ont été largement utilisées en raison de leur efficacité et de leur disponibilité (Environnement Canada, 2005). Par contre, les impacts environnementaux associés à ces substances ont poussé le Québec à interdire l'utilisation comme abat-poussière de toute huile, usée ou non (RRQ, c. Q-2, r. 32, art. 14). Ainsi, en excluant les huiles, cinq principaux types d'abat-poussières chimiques peuvent être abordés. Chacune de ces substances possède un mode d'action particulier, ce qui occasionne des avantages et des inconvénients à leur utilisation.

Le premier groupe renferme les substances hygroscopiques inorganiques telles que les chlorures de calcium et de magnésium. Ces substances agissent sur l'humidité du sol en y favorisant la conservation de l'humidité (ENCEN, 2011; Roe, 2003). Le second groupe comprend les substances polymères, telles que l'acétate de vinyle et l'acétate d'acrylique synthétique (Midwest Industrial Supply inc., 2012), qui modifient la cohésion du sol en permettant des liaisons entre les particules à la surface du sol (ENCEN, 2011). Le troisième groupe est composé de substances tensio-actives (i.e. surfactants) qui permettent à l'eau de mieux entourer les particules de sol, ce qui fait en sorte que le sol peut retenir plus d'humidité (ENCEN, 2011; Roe, 2003). Le quatrième groupe comprend les produits organiques à base de lignine, dont les lignosulfonates. Ces substances recouvrent les particules du sol pour les rendre plus lourdes et augmentent la cohésion du sol ainsi que sa teneur en matière organique (Environnement Canada, 2005). Le cinquième type d'abat-poussière comprend une autre gamme de composés organiques, soit les sucres, qui sont plus labiles que la lignine. Le jus de betterave, la gomme de guar et l'amidon de maïs en sont des exemples (Edvardsson *et al.*, 2012; Rantec Corporation, 2007). Ces substances sont hygroscopiques, elles agissent donc de la même façon que les sels du premier groupe pour abattre les poussières (Sillick et Gregson, 2010; Wisconsin Transportation Information Center, 1997), mais elles peuvent aussi former des liaisons de la même façon que les polymères, principalement concernant la gomme de guar (Rantec Corporation, 2007). La différence est dans la nature des molécules, qui sont organiques dans ce cas-ci.

4.2.1 Efficacité de réduction des émissions de poussières

L'efficacité de réduction des émissions de poussières de chacun des types de substances a été évaluée par plusieurs auteurs. Un résumé des efficacités rapportées dans différentes études pour quatre des cinq types d'abat-poussière est présenté au tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Minimum et maximum d'efficacité de réduction des émissions de poussières par divers abat-poussières

Substance	Efficacité de réduction (%)	
	Min.	Max.
Sels hygroscopiques	42	80
Polymères	25	70
Surfactants	20	40
Lignosulfonates	42	61
Sucres organiques	ND	ND

(compilation d'après Muleeki et Cowherd, 1987, p. 5; Minnesota Department of transportation, 2009, p. 22; NIOSH, 2003, p. 79; Sanders *et al.*, 1997, p.396; Thompson et Visser, 2007, p. 445; USEPA, 1987, p. 20)

Les plages d'efficacité rapportées pour chacun des types sont assez larges. L'efficacité d'un même abat-poussière est influencée par le taux d'application, les perturbations subies (nombre et type de véhicules passants), les précipitations, le taux d'évaporation et le type de sol (Thompson et Visser, 2007). Les fréquences d'application dans les études consultées variaient entre deux semaines et quatre mois. Certaines de ces études étaient réalisées sur des routes publiques non asphaltées avec le passage de véhicules légers, alors que d'autres étaient sur des routes de mines non asphaltées avec le passage de camions lourds. Les études ont été réalisées en zones tropicales, semi-arides et tempérées. On peut donc affirmer que le portrait d'efficacité présenté couvre un large éventail de situations, ce qui explique l'étendue des plages d'efficacité. Malgré cela, on peut distinguer une tendance dans les données. On observe en ordre d'efficacité les sels hygroscopiques, les polymères, les lignosulfonates et les surfactants.

Les polymères sont généralement déconseillés pour les surfaces fortement perturbées (ENCEM, 2011; Muleeki et Cowherd, 1987; Thompson et Visser, 2007). Cela est dû à leur mode d'action qui consiste à créer une couche de liaison entre les particules. Les liaisons sont détruites par les perturbations de la surface, détruisant par le fait même l'action de l'abat-poussière. Les efficacités rapportées proviennent d'études réalisées sur des voies

de circulation, ce qui jouerait en défaveur de ces substances, car ce genre de substance peut s'avérer très efficace pour éviter l'érosion par le vent de piles de matériaux ou de surfaces à nu (Thompson et Visser, 2007; San Diego State University, 2004). Dans le cas de l'application sur des piles de matériaux, il est à considérer que l'utilisation d'un tel type de produit puisse altérer la qualité du matériau sur lequel il est appliqué (ENCEN, 2011). Dans certains cas, il peut alors être pertinent d'utiliser un polymère organique tel que la gomme de guar, qui peut atteindre une efficacité de près de 100 % de réduction dans certaines conditions (Rantec Corporation, 2007; San Diego State University, 2004). Cette substance est d'ailleurs utilisée pour la stabilisation de piles de combustibles dans une usine de Graymont (Fortin, 2012).

Bien qu'aucune étude d'efficacité absolue n'ait été rapportée pour les abat-poussières organiques à base de sucre, Edvardsson *et al.* (2012) ont réalisé une étude comparative entre des sucres organiques, des sels hygroscopiques et des lignosulfonates. Cette étude était réalisée sur des routes publiques non asphaltées de Suède et utilisait des taux d'application comparables pour chaque substance. Les conclusions de cette étude établissent le même ordre d'efficacité que celui qui se dégage des valeurs rapportées dans le tableau 4.4. Pour ce qui est de l'efficacité des sucres organiques, l'étude a établi que leur efficacité était légèrement inférieure à celle des sels et des lignosulfonates. Selon Sughar (2012), avec les sels hygroscopiques, il faut faire trois applications par année, alors qu'il faudrait en faire quatre pour obtenir une efficacité semblable avec un sucre organique comme le jus de betterave.

Il apparaît donc que les sels hygroscopiques sont les plus efficaces, alors que les surfactants sont les moins efficaces. Les polymères ont une efficacité intermédiaire sur les voies de circulation, mais sont potentiellement très efficaces sur les surfaces non perturbées. Selon Edvardsson *et al.* (2012), la différence d'efficacité entre les sels hygroscopiques, les lignosulfonates et les sucres organiques n'est pas suffisante pour faire un choix entre ces abat-poussières uniquement sur cette base. Il semble alors pertinent de poursuivre la comparaison entre ces types de substances sur la base d'autres considérations.

4.2.2 Aspects environnementaux

Les impacts environnementaux ont été évalués pour les divers types de substances. Toutes ces substances peuvent relâcher des composés dans l'environnement. Loreto *et al.* (2002) ont conclu que les substances qui relâchaient les plus importantes quantités de contaminants étaient les polymères acryliques, suivis des sels hygroscopiques, puis des lignosulfonates. Les sucres organiques relâchent très peu de composés et ceux qui sont relâchés ont un temps de résidence très court dans l'environnement (*Ibid*). Les concentrations observées dans les eaux de lessivage de zones traitées avec toutes les substances ne semblent pas avoir d'effet négatif sur la qualité de l'eau, selon les critères de qualité de l'eau reconnus internationalement (Beighley *et al.*, 2009; Goodrich *et al.*, 2009; Loreto *et al.*, 2002). De plus, des tests écotoxicologiques réalisés sur les sels, les surfactants, les lignosulfonates et les sucres n'ont révélé aucun impact négatif sur les organismes étudiés (Adams, 1988; Edvardsson *et al.*, 2012).

Le Bureau de normalisation du Québec (BNQ) considère tout de même que les lignosulfonates ont des effets néfastes démontrés sur les organismes aquatiques (Ministère des Transports du Québec, 2003). Cela apporte des restrictions d'usages pour ces composés issus de la fabrication du papier. Selon Adams (1988), ces considérations toxicologiques sont reliées à la présence d'organochlorés persistants dans les solutions de ces substances. Ces organochlorés sont générés par le blanchiment au chlore du papier. Ainsi, les lignosulfonates issus de papetières qui ne blanchissent pas au chlore ne devraient pas causer ces problèmes toxicologiques. Cela porte à croire que les lignosulfonates peuvent être entièrement sans danger. Il reste tout de même une certaine incertitude concernant leur utilisation.

Les sels hygroscopiques ne sont peut-être pas non plus totalement sans danger. Shapiera *et al.* (2012) ont observé que ces substances étaient capables de modifier les populations de daphnies *Daphnia spp.* dans les plans d'eau adjacents à une route traitée avec ces sels.

Pour ce qui est des polymères synthétiques, des études ont révélé que de telles substances pouvaient se dégrader et se déplacer dans l'environnement (Smith *et al.*,

1997) et que les substances issues de cette dégradation pouvaient avoir des effets toxiques sur l'être humain (Bettencourt *et al.*, 2010). Une étude d'évaluation des risques environnementaux a été réalisée concernant l'utilisation de ces substances dans des revêtements (i.e. peintures). Selon les scénarios d'exposition étudiés, les risques écotoxicologiques étaient très faibles (Guiney *et al.*, 1998). Malgré ces résultats, on peut s'attendre à ce que l'usage de ces substances comme abat-poussière entraîne des taux de ruissellement plus importants. Cela fait en sorte que l'exposition à ces substances est potentiellement plus grande pour ces usages, ce qui augmente les risques écotoxicologiques.

On peut donc affirmer qu'à l'exception des sucres organiques, toutes les substances abat-poussières étudiées comportent des incertitudes quant à leurs impacts environnementaux. Certaines études ne leur attribuent aucun effet, alors que d'autres leur rapportent des impacts réels sur l'environnement. En outre, il semble que les polymères synthétiques soient les substances les plus problématiques. Pour les autres abat-poussières, les impacts rapportés sont relativement faibles et ils sont observés de façon inconsistante. Cela suggère que leur utilisation permettrait la réduction des émissions de poussières tout en ayant des impacts environnementaux acceptables. Les sucres organiques demeurent tout de même les substances les moins à risque pour l'environnement.

4.2.3 Aspects techno-économiques et comparaison finale des abats-poussières

Les cinq types de substances s'appliquent en solutions aqueuses, ce qui nécessite un moyen tel qu'un camion-citerne pour asperger les surfaces à traiter. Pour les sels hygroscopiques, il est aussi possible de les étendre sous forme solide, mais ce mode d'application est moins efficace, car la dispersion est moins uniforme (Edvardsson *et al.*, 2012). Certaines entreprises offrent d'ailleurs le service d'application d'abat-poussière, ce qui peut être intéressant pour un exploitant qui ne veut pas se munir de tous les équipements nécessaires (Les entreprises Bourget, 2012).

Avant d'appliquer un abat-poussière sur une route non asphaltée, il est essentiel de travailler la surface. Cela signifie de niveler la surface et de s'assurer du bon drainage de la route avec un léger dénivelé du centre de la route vers l'accotement. Il est aussi bon

d'éviter que les agrégats soient trop compactés et il est essentiel que la surface de la route soit humide afin de permettre à l'abat-poussière de bien pénétrer et d'adhérer à la route. De plus, si une pluie est prévue peu de temps après l'application, il est préférable de la remettre à plus tard pour éviter le lessivage et la dilution du produit. (Edvardsson *et al.*, 2012; NIOSH, 2003)

Au Québec, l'application d'abat-poussière est normée par le BNQ. Le MDDEP considère que seuls les produits certifiés conformes par le BNQ sont acceptables pour être utilisés comme abat-poussières (MDDEP, 2003). Les seuls abat-poussières recensés approuvés par le BNQ sont les sels de magnésium et de calcium ainsi que les lignosulfonates d'ammonium. L'exploitant désirant utiliser d'autres types d'abat-poussières devrait donc consulter le MDDEP avant leur utilisation.

Les coûts des divers types d'abat-poussières sont assez différents d'un produit à l'autre. Ces coûts sont influencés par le type d'abat-poussière, la distance d'approvisionnement et le nombre d'applications nécessaires. Le tableau 4.5 présente les coûts de divers abat-poussières distribués au Québec en considérant leur utilisation sur le site à l'étude.

Tableau 4.5 : Comparaison des coûts de divers abat-poussières distribués au Québec pour le site à l'étude

Type	Abat-poussière	Application (L/m)	Application par année (nombre)	Coût application	Coût du produit			Coût total
				\$/ha*an	\$/L	\$/ha	\$/ha*an	\$/ha*an
Sels hygroscopiques	Sels de magnésium	1,5	3	240	0,30	4 500	13 500	13 740
Polymères synthétiques	Acétate d'acrylique/vinyle	ND	ND	ND	ND	6 900	ND	ND
Lignosulfonates	Lignosulfonate d'ammonium	1,5	5	Inclus avec le produit	0,28	4 200	21 000	21 000
Sucres organiques	Jus de betterave	1-2	4	320	0,61	9 150	36 600	36 920
Sucres organiques	Gomme de guar	45 kg/ha	20	1600	10 \$/kg	454	9 072	10 672

(compilation d'après Houde, 2012; Gillies *et al.*, 1999, p. 14; Les Entreprises Bourget, 2012; Sughar, 2012; Fortin, 2012)

Le polymère synthétique pourrait être le moins cher, mais les informations obtenues ne permettent pas de déterminer clairement si plus d'une application est nécessaire par année, ce qui rend difficile la comparaison avec les autres substances. On peut donc

affirmer que le produit le moins dispendieux serait la gomme de guar, malgré les nombreuses applications nécessaires. Cet abat-poussière n'est pas conseillé pour les superficies perturbées telles que les routes, mais son utilisation pour la protection des superficies érodables et des piles de matériaux semble toute désignée, pourvu que le matériau n'en soit pas affecté.

Le second abat-poussière le moins onéreux serait les sels de magnésium. Cette solution est intéressante pour les routes non asphaltées. En contrepartie, les sels hygroscopiques sont très agressifs, ce qui cause la corrosion prématurée des équipements mobiles circulant sur les routes (ENCEN, 2011; USEPA, 2002). Les coûts associés à ces usures prématurées sont difficiles à évaluer, mais il faudrait tout de même les garder en tête lors du choix d'un abat-poussière. Cela peut rendre l'utilisation des sels hygroscopiques moins intéressante sur le long terme. Les lignosulfonates sont légèrement plus dispendieux que les sels, mais ils ne présentent aucun risque de corrosion. L'utilisation de ces substances sur les routes non asphaltées devrait donc être considérée malgré leur prix. Le jus de betterave est de loin celui qui coûte le plus cher, mais il ne comporte pas les risques de corrosion des sels et ne présente que très peu de risques environnementaux. Son prix peut être prohibitif, mais il comprend tout de même ces avantages.

En considérant les coûts, on peut donc conclure que les abat-poussières de type sels hygroscopiques ou lignosulfonates sont tous les deux intéressants d'utilisation pour les routes non asphaltées, mais les lignosulfonates ont potentiellement un avantage sur le long terme puisqu'ils ne comportent pas de risque de corrosion des véhicules. Pour ce qui est des superficies érodables, la gomme de guar s'avère la meilleure solution.

Pour n'importe lequel des abat-poussières, avant d'en considérer l'utilisation, il faut penser à deux choses. Premièrement, il a été établi que leur utilisation nécessitait un certain investissement. On peut donc affirmer que les abat-poussières ne sont pas flexibles, car on traite une surface pour un certain temps, à un certain coût (Houde, 2012; USEPA, 2002). Sur les routes, afin de maximiser l'efficacité de l'investissement, il est alors préférable d'appliquer l'abat-poussière là où il sera le plus utile, c'est-à-dire là où il y a beaucoup de circulation. Il faut donc éviter de les appliquer sur des routes qui sont utilisées de façon ponctuelle ou temporaire. Deuxièmement, sur le site d'une usine de

concassage, il y a beaucoup de transport et de manutention de matériaux. Ces activités sont très sujettes à provoquer des déversements de matériaux fins sur les routes et autres superficies. Un déversement de matériau sur une chaussée fraîchement traitée par un abat-poussière fera en sorte de rendre le traitement pratiquement inutile puisque le nouveau matériau déposé en surface ne sera pas traité et sera entièrement sujet à la remise en suspension dans l'atmosphère. Il faut donc soit déterminer d'appliquer un abat-poussière uniquement dans les zones où les déversements sont peu probables, soit travailler à éliminer les déversements à la source. Advenant le cas où ce soit impossible, l'application d'abat-poussières serait inutile.

4.3 Asphaltage

L'asphaltage permet de couvrir le sol d'un matériau consolidé qui ne peut être remis en suspension par le passage de véhicules. Sur le site à l'étude, l'entrée de l'usine et le stationnement autour des bureaux sont asphaltés. Le camion-citerne utilisé pour appliquer de l'eau sur le site possède des buses orientables qui permettent de nettoyer cet asphalte. D'autres zones du site à l'étude pourraient être asphaltées, selon l'efficacité et l'applicabilité de cette solution.

4.3.1 Efficacité de réduction des émissions de poussières

La réduction des émissions de poussières occasionnées par l'asphaltage peut être de plus de 90 %, mais elle peut aussi s'avérer n'être que de 4 % (WRAP, 2006). Tout dépend de la quantité de poussières qui est redéposée par dessus l'asphalte ainsi que de l'efficacité et de la rapidité de l'enlèvement de ces poussières. Il y a donc deux fronts sur lesquels on peut agir pour assurer l'efficacité d'un asphaltage : éviter la déposition de poussières et nettoyer la surface.

Le nettoyage est efficace uniquement s'il assure que la surface soit toujours exempte de poussières. De plus, s'il est effectué avec un balai mécanique, il n'est guère possible de réaliser une efficacité au-delà de 26 %, car cette technique contribue à remettre les poussières en suspension, en plus de ne pas réussir à les éliminer complètement de la surface. C'est donc le nettoyage avec camion aspirateur ou avec de l'eau qui est le plus

efficace et qui permet d'atteindre 90 % et plus, à condition que le nettoyage soit fait suffisamment souvent. (WRAP, 2006)

La fréquence de nettoyage nécessaire à conserver l'asphalte propre dépend de la vitesse à laquelle la poussière s'y dépose. Ainsi, éviter la déposition de poussières permet de réduire la fréquence de nettoyage nécessaire. Il existe diverses stratégies qui permettent d'éviter le dépôt de poussières sur l'asphalte. La première stratégie à mentionner serait la réduction des émissions de poussières de toutes les autres sources du site, mais ce n'est pas la seule. Les camions qui circulent de la surface non asphaltée à la surface asphaltée entraînent avec eux des matériaux poussiéreux qui se déposent sur l'asphalte. Afin d'éviter cela, on peut minimiser la circulation entre les deux surfaces. Si la superficie asphaltée est très petite, cela peut être difficilement réalisable. Une autre possibilité est l'utilisation d'abat-poussières sur les surfaces non asphaltées aux abords de celles qui le sont, ce qui retiendra partiellement les matériaux et réduira leur entraînement vers l'asphalte.

4.3.2 Aspects environnementaux

D'un point de vue environnemental, l'asphaltage représente une coupure de la capacité de drainage d'une surface, ce qui augmente le ruissellement et l'érosion des surfaces et cours d'eau environnants (Zhao et Zhao, 2012). De plus, le nettoyage de l'asphalte avec de l'eau occasionne plus d'eau de ruissellement, qui devient chargée des particules qui sont enlevées de l'asphalte. Cela contribue à augmenter l'érosion des surfaces et cours d'eau environnants. Si le nettoyage de l'asphalte se fait par aspirateur, c'est plutôt les boues générées de l'aspiration des matériaux qui sont préoccupantes, puisque ces boues doivent être éliminées dans les lieux d'enfouissement technique. La présence d'asphalte représente donc certains désavantages du point de vue de l'environnement.

L'énergie nécessaire à produire et à installer l'asphalte occasionne d'importantes émissions de gaz à effet de serre (Gschösner *et al.*, 2012). Certaines méthodes émergentes de production de mélange d'asphalte tiède ou froid sont par ailleurs des alternatives qui permettent de réduire ces émissions (Rubio *et al.*, 2012). Si l'installation

d'asphalte est envisagée, il sera important de considérer ces méthodes afin de ne pas générer plus d'impacts environnementaux que les réductions recherchées.

4.3.3 Aspects techno-économiques

Le coût de l'asphaltage est assez élevé. Au moment d'écrire ces lignes le prix moyen était de 22 \$/m² pour une épaisseur de 5 cm (Duchesneau, 2012), ce qui donne environ 20 000 \$ pour un tronçon de route de 100 m de long. De plus, il faut ajouter les coûts de nettoyage qui sont nécessaires. Si le service est disponible, le nettoyage peut être fait par une compagnie sous-traitante. Sinon, l'achat d'un système de nettoyage peut être nécessaire. Un balayeur mécanique représente environ 25 000 \$, mais c'est un système très peu efficace (Fortin, 2012). Pour l'achat d'un aspirateur qui est le meilleur équipement de nettoyage, il faut s'attendre à dépenser près de 200 000 \$ (*Ibid*). Le résumé des coûts annuels de l'utilisation d'un camion aspirateur pour le nettoyage des surfaces asphaltées sur le site d'une usine de concassage est présenté au tableau 4.6. Ce site comprend l'équivalent de 1,9 km de routes asphaltées.

Tableau 4.6 : Coûts d'immobilisation et récurrents pour l'utilisation d'un camion aspirateur pour nettoyer les surfaces asphaltées d'une usine de concassage qui comprend 1,9 km de routes asphaltées à nettoyer

Type de coût	Coût (\$/an)
Coût d'immobilisation (amorti sur 10 ans)	20 000
Coût d'opération	15 000
Coût d'entretien	5 000
Total	40 000

(inspiré de Graymont, 2012b)

Bien que les coûts d'immobilisation de cet équipement soient élevés, les coûts d'opération sont relativement faibles puisque les voies asphaltées n'ont pas à être nettoyées chaque jour, mais plutôt environ une fois par semaine, selon la déposition des poussières (ENCEN, 2011; Guentert, 2012). Cet équipement représente tout de même un certain investissement et son utilité est limitée. Le camion avec buses orientables pour le nettoyage utilisé sur le site à l'étude est probablement une solution plus économique vu la

taille actuelle de la superficie asphaltée. Advenant le cas d'un asphaltage plus grand, ce type de camion devrait être évalué pour le nettoyage des surfaces asphaltées.

On peut donc affirmer que l'asphaltage peut représenter une réduction des émissions de poussières, mais il doit être accompagné d'un entretien de la chaussée et de mesures pour réduire la déposition des poussières, ce qui représente des investissements et coûts récurrents considérables.

4.4 Positionner des écrans

Les écrans sont des structures artificielles ou naturelles qui agissent sur le vent qui occasionne l'érosion des piles et autres surfaces à nu. Il existe divers types d'écrans. Par exemple, on retrouve des structures de métal, de béton ou de plastique, ainsi que des merlons fabriqués de pierre ou de terre. Lorsqu'elles sont placées en amont par rapport au vent, ces structures bloquent le vent, alors qu'en aval, elles peuvent capter les poussières (ENCEM, 2011). La principale utilité de ces structures est pour la protection de piles, bien que leur présence permette de protéger les surfaces à nu.

4.4.1 Efficacité de réduction des émissions de poussières

Selon les données recueillies par le WRAP (2006), l'efficacité d'ériger des barrières varie de 4 à 88 % de réduction des émissions. Cela suggère une forte variabilité dans l'efficacité des écrans. La porosité est un facteur qui influence cette efficacité, mais le positionnement par rapport à une pile à protéger est le plus important des paramètres (ENCEM, 2011; New-Zealand Ministry for the Environment, 2001).

Une barrière entièrement pleine telle qu'un mur de ciment ou un merlon apparaît la solution la plus efficace (New-Zealand Ministry for the Environment, 2001), mais une étude de Torno *et al.* (2011) révèle que les barrières poreuses peuvent être plus efficaces que les barrières pleines, car la barrière pleine occasionne des courants d'air concentrés par effet venturi. Diverses études ont montré que des barrières poreuses jusqu'à 50 % avaient la même, sinon une meilleure efficacité qu'un mur plein (Ferreira et Lambert, 2011; Stunder et Ayra, 1988).

Pour ce qui est du positionnement des écrans, selon Stunder et Ayra (1988), la localisation et les dimensions des barrières seraient optimales lorsque les critères suivants sont respectés :

- sa hauteur est égale à celle de la pile;
- sa longueur est égale à la longueur de la pile à la base;
- sa distance par rapport à la pile est égale à la hauteur de la pile.

Par contre, considérant le fait que la direction du vent change au court d'une année, il est en pratique plus efficace d'installer des arrangements d'au minimum deux clôtures à angle orientées face aux vents dominants (Cong *et al.*, 2011; Yeh *et al.*, 2010). De telles structures ont été installées à l'usine d'Exshaw de Graymont (voir figure 4.3).



Figure 4.3 : Clôture brise-vent pour protéger des piles de matériaux
(tiré de Graymont, 2011b, p. 13)

Une autre possibilité est de penser l'exploitation du site en fonction des écrans tels que les parois abruptes des carrières ou les collines et montagnes présentes sur le site. Le positionnement stratégique des exploitations et de l'entreposage des matériaux par rapport à ces écrans peut apporter jusqu'à 93 % d'efficacité de réduction des émissions (WRAP, 2006). Lorsqu'on prévoit utiliser ce genre d'écran, il est essentiel de vérifier à ne pas causer un effet de venturi en créant des corridors préférentiels pour le vent, ce qui ne ferait qu'aggraver les problèmes de poussières (ENCEM, 2011). Dans le même ordre d'idées, l'entreposage même des matériaux peut servir d'écran pour le vent. En utilisant

les matériaux les plus grossiers pour protéger les moins grossiers de l'effet du vent, on peut réduire les émissions de poussières jusqu'à 48 % (Cong *et al.*, sous presse).

4.4.2 Aspects environnementaux

L'installation d'écrans comporte peu de considérations environnementales, si ce n'est qu'elles peuvent être considérées peu attrayantes pour l'œil (WRAP, 2006). À cet effet, pour les endroits où l'aspect visuel est une préoccupation, les merlons de pierre et de terre ont l'avantage qu'ils peuvent être végétalisés. L'utilisation de végétation en tant que brise-vent à part entière est d'ailleurs étudiée dans la prochaine section du chapitre.

Pour ce qui est des écrans plus massifs tels que ceux en béton ou ceux en pierre et terre, on peut noter qu'en plus de bloquer le vent, ils peuvent contribuer à réduire les émissions de pollution sonore (Van Renterghem et Botteldooren, 2012).

4.4.3 Aspects techno-économiques

L'érection d'écrans pose un problème avec la nature des opérations d'une usine de concassage, car ce type d'opération est constamment en évolution, ce qui fait que les opérations de la carrière tout comme l'emplacement et la taille des stocks de matériaux sont fréquemment modifiés. La nature fixe des écrans peut donc poser certains problèmes, surtout lorsque l'on considère que pour être efficaces, ces écrans doivent être particulièrement bien positionnés en regard des piles de matériaux à protéger.

Les coûts associés à la fabrication et à l'installation d'une section d'environ 100 m de long d'une clôture poreuse, telle que celle présentée à la figure 4.3, s'élèvent à 150 000 \$, ce qui représente 15 000 \$ par année pour un amortissement sur 10 ans (Graymont, 2012b). L'utilisation des barrières naturelles ou la planification des exploitations par rapport aux autres activités génératrices de poussières peut donc comporter l'avantage de coûter moins cher, bien que ces méthodes nécessitent beaucoup plus de planification. Le positionnement stratégique des piles ou même l'érection de merlon à partir du découvert retiré de l'exploitation peut aussi s'avérer une alternative très économique puisque la gestion des piles ou des découverts doit être faite de toute façon. Il ne suffit alors que de déterminer les meilleurs emplacements pour ces matériaux.

4.5 Végétaliser

La végétalisation comporte deux facteurs de réduction des émissions de poussières. D'une part, elle permet la formation d'un écran tel qu'il a été décrit dans la section précédente et, d'autre part, elle permet la couverture et la consolidation du sol.

4.5.1 Efficacité de réduction des émissions de poussières

L'efficacité de la végétalisation en tant qu'écran est considérée relativement faible, car elle ne permet d'atteindre qu'environ 25 % de réduction (WRAP, 2006). Lors de la conception d'une barrière végétale, la sélection des espèces est cruciale, car celles-ci possèdent toutes une taille, une structure, une flexibilité et une densité de feuillage distincte, ce qui influence leur capacité de ralentissement du vent ou de captage des poussières (Bouvet *et al.*, 2007; Grant, 1985; Steffens *et al.*, 2012). Les conifères tels que les épinettes ou les thuyas semblent être largement utilisés (Grant et Nickling, 1998; Rosenfeld *et al.*, 2010). Ces espèces sempervirentes peuvent être à privilégier pour leur feuillage très dense et la protection constante qu'ils offrent pendant l'année. D'autres types d'espèces peuvent être utilisés. Par exemple, Ferreira (2011) suggère les peupliers à cause de leur croissance rapide, de leur grande taille et de leur feuillage abondant.

Un aspect essentiel de la conception d'un écran de végétaux est la porosité. Selon diverses études, une porosité de 30 à 50 % permettrait les meilleures capacités de blocage du vent et de retenue des particules (Grant et Nickling, 1998; Zhan et Cong, 2008). La porosité d'une barrière peut être déterminée par le choix des espèces et la distance entre chaque arbre. Les travaux de Loeffler *et al.* (1992) permettent de déterminer qu'un conifère seul présente une porosité tout près de zéro. Cette affirmation est surtout vraie pour les épinettes et les thuyas, alors que les pins présentent une porosité plus près de 10 % (*Ibid*). Loeffler *et al.* (1992) ont aussi mesuré l'effet de la distance entre les arbres sur la porosité d'un écran de conifères. Leurs résultats laissent croire que pour atteindre 30 à 50 % de porosité, les arbres devraient être distancés d'au moins deux mètres dans le cas de pins et de plus de deux mètres pour les épinettes et les thuyas. Pour ce qui est des espèces feuillues telles que les peupliers, avec leur importante

porosité de 60 % (Ferreira, 2011), ils devraient être distancés de moins de deux mètres afin de maximiser leur capacité de ralentissement du vent.

Le feuillage des conifères est mieux distribué que celui des feuillus, qui ont moins de branches à leur base. Ainsi, afin d'optimiser l'efficacité d'une barrière constituée de feuillus, il est préférable de penser à combiner plusieurs espèces qui pourront occuper les divers étages de la canopée à mesure que les plantes croissent, ce qui maximise l'effet d'écran à travers le temps (Ferreira, 2011). Comme les conifères croissent généralement moins vite que les feuillus (surtout pour les peupliers), planter des conifères et des feuillus dans une même haie peut être une alternative intéressante. Les feuillus atteindront rapidement une certaine hauteur, laissant des trous plus bas qui peuvent être occupés par les jeunes conifères. De cette façon, l'écran sera plus complet et plus durable dans le temps.

La sélection des espèces ne doit par contre pas être faite uniquement sur la base de leurs capacités de brise-vent. Pour assurer la réussite d'un projet impliquant des végétaux, la principale préoccupation devrait être de s'assurer que les espèces plantées sont adaptées au milieu hôte. Les caractéristiques du sol en place sont des indicateurs importants (ex. : drainage et pH). Sur le site dont il est question, il faut privilégier les espèces alcalinophiles qui s'adaptent bien aux sols calcaires. L'épinette blanche, le thuya occidental et le peuplier baumier en sont des exemples (Pellerin *et al.*, 1993). De plus, les pressions potentielles du milieu sont à considérer, telles que les chevreuils qui peuvent détruire une plantation complète (Loyer, 2012).

En outre, dans le cas où on considère la végétalisation pour son effet sur le sol où elle est implantée, l'érosion de ce sol peut être réduite jusqu'à 100 % (New-Zealand Ministry for the Environment, 2001). Encore une fois, les espèces devraient être choisies en fonction du milieu. Les herbacées de diverses espèces peuvent être utilisées à cette fin puisqu'elles peuvent couvrir et consolider le sol adéquatement avec leurs réseaux racinaires (Andrés *et al.*, 1996; Moreno-de las Heras *et al.*, 2009). Si les couvertures végétales doivent être appliquées sur des sols pauvres tels que ceux formés de résidus de pierre issus de l'exploitation de la carrière, les fabacées semblent les mieux adaptées, probablement à cause de leur capacité de fixation de l'azote (Moreno-Penaranda *et al.*,

2004). Encore, cette couverture végétale du sol peut être combinée avec l'implantation d'un écran végétal afin d'améliorer la performance totale du système.

4.5.2 Aspects environnementaux

Peu d'aspects environnementaux négatifs sont identifiables pour de telles mesures de végétalisation. Le choix des espèces peut tout de même avoir un impact sur les plantes indigènes. L'introduction de plantes étrangères peut avoir des conséquences importantes sur un écosystème (Fagan et Peart, 2004; McDonald *et al.*, 2008). Ainsi, il est préférable de choisir des espèces qui sont indigènes plutôt que des espèces horticoles introduites.

L'implantation d'écrans faits de végétaux peut être intéressante pour le fait que cela contribue à améliorer l'aspect visuel d'un site (Gandemer, 1979).

4.5.3 Aspects techno-économiques

Le reboisement n'a que des applications limitées. Il a déjà été discuté dans la section précédente que les écrans artificiels s'adaptent mal à l'évolution d'un site. On peut considérer que c'est d'autant plus le cas pour les écrans de végétaux puisqu'il est plus difficile de les déménager que les clôtures artificielles. De plus, les écrans de végétaux occupent plus d'espace que les écrans poreux artificiels comme les clôtures.

Le risque qu'une plantation soit un échec peut être important si les espèces ont mal été choisies, ce qui peut rendre cette alternative moins intéressante. Dans ce cas, les services de professionnels devraient être retenus pour prendre les bonnes décisions.

Il a été déterminé que la constitution d'un écran végétal à base de diverses espèces ainsi que l'association d'un tel écran avec une couverture herbacée au sol comportent plusieurs avantages. Le coût d'un reboisement complet comprenant une couverture avec du sol organique, la plantation d'espèces herbacées au sol ainsi que la plantation d'arbres aux deux mètres est de 2 \$/m ou 20 000 \$/ha (Fortin, 2012; Houde, 2012). On parle donc de 2 000 \$/ha par année pour un amortissement sur 10 ans. Ainsi, malgré la faible efficacité des écrans de végétaux, leurs faibles coûts peuvent en faire des alternatives intéressantes dans certains cas.

4.6 Contrôle de la vitesse des véhicules

La réduction de la vitesse de déplacement des équipements mobiles peut contribuer à réduire les émissions de poussières en limitant la turbulence au-dessus des voies de circulation (ENCEM, 2011).

4.6.1 Efficacité de réduction des émissions de poussières

L'efficacité d'une telle mesure peut être très importante. Il semble que l'effet de réduction soit proportionnel à la vitesse, c'est-à-dire que de passer d'une vitesse de 30 km/h à 15 km/h permet une réduction de 50 % des émissions du passage des véhicules (New-Zealand Ministry for the Environment, 2001).

4.6.2 Aspects environnementaux

Les impacts environnementaux liés à cette mesure sont positifs, c'est-à-dire qu'on peut s'attendre, en plus des réductions de poussières, à une réduction du bruit de la circulation sur le site ainsi qu'à une réduction de la consommation d'essence puisque celle-ci est étroitement liée à la vitesse de conduite. Sandberg (2001) a déterminé qu'à chaque fois que l'on augmente de 10 % la vitesse de conduite d'un camion lourd, on augmente sa consommation de carburant de 6,2 %.

4.6.3 Aspects techno-économiques

Réduire la vitesse des équipements mobiles peut occasionner une baisse de productivité à l'usine. À cet égard, il faut idéalement éviter que les camions qui circulent entre la carrière et le concasseur ne suffisent plus à alimenter l'usine. Pour ce faire, on peut réduire de beaucoup la vitesse des camions, mais en augmentant leur nombre, on évite d'affecter la production. Cette option occasionnera tout de même une augmentation des coûts de production à cause des salaires des opérateurs de camions supplémentaires.

Des réductions de vitesse peuvent être réalisées sans impacter le taux de production de l'usine. Il a été observé qu'au point d'alimentation du concasseur, des camions pouvaient se retrouver à patienter avant que celui-ci soit suffisamment libre pour qu'ils puissent

décharger. Cela signifie que le camion aurait pu circuler plus lentement et arriver à destination exactement au bon moment pour se décharger, au lieu d'attendre une fois arrivé. De cette façon, le camion peut émettre moins de poussières, réduire sa consommation de carburant et assurer que la productivité de l'usine ne soit aucunement affectée. Certaines entreprises minières utilisent d'ailleurs des systèmes de gestion du transport qui localisent chacun des camions de transport de minerais en tout temps et qui leurs indique s'ils doivent ralentir ou aller se ravitailler en carburant de sorte qu'ils ne sont jamais en train d'attendre inutilement (Thompson *et al.*, 2004).

En considérant une réduction de la vitesse de 10 %, pour passer de 50 à 45 km/h, on obtiendrait un gain monétaire annuel de 2 \$ par km de route parcourue entre la carrière et le concasseur du site à l'étude. Cette valeur est obtenue en considérant que le diesel coûte 1,20 \$/L et que la consommation des camions est calculée conformément aux équations de Sandberg (2001), soit de 3,00 et 1,86 L/100 km pour chacune des vitesses respectivement. Pour les 17 000 km parcourus annuellement entre la carrière et le concasseur, cela représente des économies de 45 000 \$ par année par km de route. Ces économies seraient nettes si les coûts de production ne sont pas affectés, ce qui est raisonnablement envisageable avec une réduction de 5 km/h.

4.7 Autres mesures

Diverses bonnes pratiques peuvent être implantées afin de limiter les émissions de poussières. Par exemple, toutes les activités qui ont de forts potentiels d'émissions de poussières devraient être réalisées lorsque les vents sont faibles ou lors des périodes pluvieuses. Il peut être question des activités de déchargement des poussières des dépoussiéreurs ou du nettoyage de la poussière dans les aires de travail. Par contre, ces activités doivent être réalisées régulièrement, ce qui peut rendre leur coordination difficile si on veut les synchroniser avec le vent et la pluie. D'autres activités n'ont pas à être réalisées aussi régulièrement, ce qui fait qu'elles se prêtent mieux à cette planification. Par exemple, on peut planifier l'enlèvement du découvert ou les opérations de terrassement en fonction des conditions météorologiques. (ENCEM, 2011)

Bien que les solutions de réduction des émissions de poussières qui concernent les sources fixes ne sont pas abordées dans ce document, il faut noter que toutes les mesures qui permettent d'éviter l'émission de poussières permettent aussi d'éviter que ces poussières s'accumulent sur le site. Cela évite donc qu'elles soient remises en suspension lors du passage des équipements mobiles et lors de forts vents. À cet égard, diverses mesures peuvent être mises en place. L'installation de dépoussiéreurs est une solution, mais elle doit être accompagnée du cloisonnement et de l'étanchéisation des équipements. De plus, il faut s'assurer que les ouvertures des cloisons et bâtiments qui protègent les équipements sont fermées en tout temps. Les points de transfert et les chutes fixes peuvent aussi être protégés par dépoussiérage et lorsque cela n'est pas possible, on peut envisager y installer des brumisateurs pour abattre la poussière. Pour les points de chute mobiles, on peut les protéger avec des bandes caoutchoutées telles que celles qui sont présentées à la figure 4.4. Enfin, peu importe les équipements mis en place pour réduire les émissions de poussières, il faut s'assurer de les entretenir adéquatement, sans quoi ils sont relativement inutiles. (ENCEM, 2011)



Figure 4.4 : Bandes caoutchoutées pour contenir les poussières d'un point de chute de matériaux

(tiré de ENCEM, 2011, p. 57)

Afin d'avoir une bonne idée des mesures de réduction des émissions de poussières pour les sources fixes, il est conseillé de consulter des ouvrages plus complets tels que le *Dust*

Control Handbook de Mody et Jakhete (1988) ou le *Guide de l'exploitant : Empoussiérage, dépoussiérage* de la Société de l'Industrie Minérale française (2001).

5 RECOMMANDATIONS

Le chapitre précédent a permis de dresser le portrait des options qui s'offraient à l'exploitant du site pour réduire les poussières de ses principales sources. Il faut maintenant choisir à appliquer les meilleures solutions, en s'assurant qu'elles sont bien adaptées au contexte précis du site à l'étude. Afin de maximiser la compétitivité de l'entreprise, tout en lui permettant d'atteindre ses objectifs de protection de l'environnement, il est pertinent de commencer par comparer les solutions étudiées sur le plan de leur efficience, c'est-à-dire de leur capacité à réduire les émissions de poussières par rapport aux ressources qui doivent être investies. Pour ce faire, les principales données présentées dans le chapitre précédent ont été compilées dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Comparaison de l'efficience de réduction des émissions de poussières pour les solutions proposées pour le site à l'étude (données par ha par an)

Voies de circulation (1 ha \approx 1,25 km de voie)					
Solution de réduction		Efficacité	Coût	Réductions	Efficience
		%	\$	TM	\$/TM
Réduire la vitesse des camions lourds		10	-55 000	2	-31 073
Eau	Buses fixes	75	<5 000	17	<302
	Camion-citerne	75	6 111	17	369
Abat-poussière	Sels hygroscopiques	80	13 740	18	777
	Lignosulfonates	61	21 000	13	1 558
Asphaltage	Construction et nettoyage	90	38 842	20	1 953
Abat-poussière	Jus de betterave	61	36 920	13	2 739
Superficies érodables					
Solution de réduction		Efficacité	Coût	Réductions	Efficience
		%	\$	TM	\$/TM
Végétaliser	Comme brise-vent	25	480	0,05	9 250
	Comme couvre-sol	90	2 000	0,19	10 706
Eau	Buses fixes	75	5 000	0,16	32 117
	Camion-citerne	75	6 111	0,16	39 254
Abat-poussière	Gomme de guar	90	10 672	0,19	57 125
Écran	Clôture poreuse à 50 %	88	60 000	0,18	328 467

Ce dernier est élaboré autour des coûts engendrés par chacune des solutions et des quantités de poussières qu'elles permettent de réduire (i.e efficience). Toutes les données

sont rapportées sur une même base, ce qui signifie que les coûts et efficacités sont exprimés en fonction de l'implantation de la solution sur un hectare par année.

Le tableau 5.1 sépare les solutions qui sont applicables aux superficies érodables de celles qui le sont aux voies de circulation. Cette distinction est importante, car la quantité de poussières émise par année pour un hectare de superficie érodable (0,2 TM) est considérablement plus basse que la quantité émise annuellement par hectare de voie de circulation (22,1 TM). C'est ce qui fait que l'efficacité de toutes les solutions présentées pour les superficies érodables est moins grande que celle des autres solutions. Il est donc plus efficace pour l'exploitant du site d'investir dans des solutions qui permettent de réduire les émissions de poussières des voies de circulation. Les calculs utilisés ne comportaient par contre pas suffisamment de détails pour différencier les émissions de l'érosion du sol de celles des émissions de l'érosion des piles. Les émissions des piles sont reconnues être les plus importantes des deux. L'efficacité de la réduction des émissions de poussières des piles est alors probablement meilleure que celle qui est présentée au tableau 5.1. La réduction de cette source d'émissions peut dans ce cas s'avérer intéressante. Dans le cas où l'on veuille réduire les émissions de cette source, l'utilisation d'écrans de végétation est alors la meilleure solution à instaurer, si les caractéristiques du site le permettent.

Au niveau des voies de circulation, dans la mesure où cela est possible, réduire la vitesse des camions lourds qui circulent entre la carrière et l'usine de concassage comporte un net avantage sur les autres solutions. C'est que cette solution génère des économies en plus de réduire les émissions de poussières, ce qui en fait une solution particulièrement intéressante. Au deuxième rang d'efficacité, on observe l'application d'eau, celle réalisée par buses fixes étant légèrement plus efficace que celle qui est faite par camion-citerne. Bien que les coûts de l'utilisation de buses fixes n'aient pas été évalués au chapitre 4, un coût annuel par hectare de 5 000 \$ a été appliqué afin de permettre la comparaison de cette solution avec les autres. Ce coût est une estimation raisonnable aux fins de la comparaison puisqu'il est légèrement en deçà de celui de l'application par camion-citerne, alors que cette dernière méthode est reconnue plus dispendieuse. En comparaison avec l'application d'eau, les autres solutions sont donc toutes moins efficaces à cause de leurs coûts. En plus, l'importance actuelle des déversements de matériaux occasionnés par leur

manutention sur le site rend l'utilisation d'abat-poussière ou d'asphaltage peu applicable. L'humidification des voies de circulation apparaît alors comme la solution qui possède les meilleurs avantages économiques. Pour ce qui est de ses impacts environnementaux, ils sont aussi moins importants que ceux des autres solutions, dans la mesure où l'eau utilisée provient de la carrière, d'où elle serait pompée de toute façon. Les constats présentés permettent alors d'établir un plan visant la réduction des émissions de poussières et qui soit spécifique au site à l'étude.

L'accent doit être mis sur les voies de circulation et la première orientation à prendre serait d'optimiser l'usage du camion-citerne qui est déjà présent sur le site. Ce camion ne suffit actuellement pas à réaliser toutes les applications d'eau qui sont nécessaires à un bon contrôle des poussières sur l'ensemble des voies de circulation. Il faudrait donc concentrer les activités du camion-citerne en le libérant de certaines zones qui pourraient être contrôlées par d'autres méthodes. Les buses d'aspersion fixes semblent bien désignées pour remplacer le camion-citerne à certains endroits. Le chemin qui longe la voie ferrée (voir figure 5.1) est alors un emplacement stratégique pour l'installation de telles buses. L'avantage de cette voie réside dans le fait qu'elle est située à pas plus de 500 mètres d'au moins un point de pompage des eaux de carrières, ce qui favoriserait le raccordement du système de buses fixes. Aussi, l'aspect linéaire de cette voie de circulation fait en sorte que l'installation de buses fixes à sa bordure n'occasionnerait pas de restriction supplémentaire à la circulation, ce qui ne serait pas le cas si les buses étaient installées sur une zone d'entreposage de matériaux, où des chargeurs et camions circulent abondamment dans tous les sens.

La distance à couvrir sur cette route est d'approximativement un kilomètre, ce qui nécessite environ un remplissage de camion-citerne de 12 000 litres par application. Les buses fixes permettraient donc de libérer considérablement le camion-citerne, qui n'aurait plus à remplir son réservoir pour appliquer de l'eau sur cette route, ni d'avoir à y passer plusieurs fois par jour pour l'humidifier. Le camion serait alors plus disponible pour assurer l'humidification d'une autre zone du site.

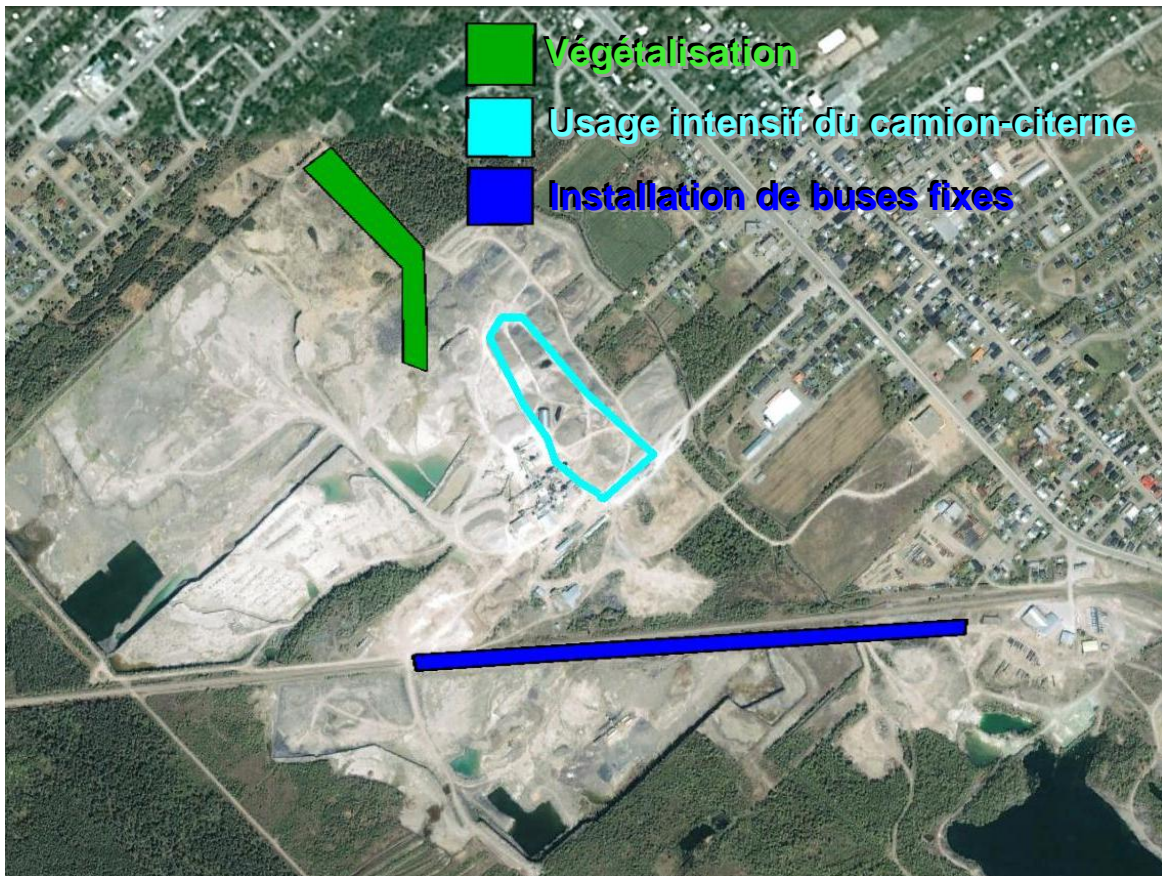


Figure 5.1 : Principales solutions de réduction des émissions de poussières recommandées pour le site à l'étude
(adaptée de Google, 2012)

La zone d'entreposage des matériaux qui est située à l'entrée nord-est du site est alors un endroit particulièrement intéressant pour intensifier l'usage du camion-citerne. Cette zone d'entreposage, incluant l'entrée asphaltée du site ainsi que les abords de l'usine de concassage, comporte plusieurs caractéristiques qui font en sorte qu'elle devrait faire l'objet d'un contrôle des poussières particulièrement efficace.

Tout d'abord, cette zone est située à la limite Est du site, au-delà de laquelle il y a un quartier résidentiel (voir figure 5.1). Les vents dominants sur le site proviennent du nord-ouest (Environnement Canada, 2012b), ce qui fait que les poussières émises de la zone d'entreposage sont dirigées directement vers l'extérieur du site, ce qui a le potentiel d'incommoder les humains comme il a été décrit dans le chapitre 1. Ensuite, cette zone

est l'une des plus achalandées sur le site à cause de tous les camions des clients qui doivent s'y rendre, ce qui en fait aussi la plus importante zone d'émissions de poussières provenant des voies de circulation. De plus, à cause des activités de chargement des camions des clients, il y a beaucoup de déversements de matériaux qui y surviennent, ce qui favorise d'autant plus les émissions de poussières. Enfin, la zone d'entreposage des matériaux est située tout près de l'entrée asphaltée du site. Les camions des clients font d'ailleurs régulièrement l'aller-retour entre la zone d'entreposage non asphaltée et la zone asphaltée, puisqu'ils doivent se rendre à la balance à camion située sur l'asphalte, avant et après leur chargement. Ces passages répétés favorisent l'empoussièrément de l'asphalte ainsi que le transport des poussières hors du site avec les camions qui quittent le site. Un contrôle accru des poussières dans la zone environnante à la surface asphaltée réduirait grandement la déposition de poussières sur cette zone, ce qui améliorerait l'efficacité de l'asphalte et réduirait du même coup la fréquence des nettoyages nécessaires.

Avec les buses fixes, on peut donc réduire les émissions des voies de circulation. Si on veut permettre d'éviter les émissions de l'érosion des piles de matériaux, il faudrait idéalement les contrôler aussi. L'installation de buses fixes sur la route qui longe la voie ferrée pourrait être l'occasion d'en installer aussi pour arroser certains matériaux fins entreposés près de cette voie (voir figure 2.1). On pourrait aussi envisager y utiliser des abat-poussières tels que la gomme de guar. Ces méthodes sont en outre toutes plus dispendieuses que l'installation d'écrans de végétaux. À cette fin, l'idéal serait de faire une planification minière où seraient identifiées les zones à exploiter, les zones où l'exploitation est terminée, les zones nécessaires à l'entreposage de matériaux et les zones qui sont inutiles. Ainsi, ces zones inutiles, qui sont des surfaces à nu, pourraient être reboisées, ce qui stabiliserait le sol et pourrait fournir des écrans. Si on veut utiliser de tels écrans pour protéger les piles de matériaux, il faut alors les orienter en fonction des vents dominants qui sont en provenance du nord-est. La figure 5.1 présente d'ailleurs une proposition de positionnement d'écrans qui serait optimal pour protéger la principale zone d'empilement des matériaux.

L'implantation des solutions identifiées permettrait donc d'obtenir d'importants gains de réduction des poussières. Pour assurer de maximiser ces gains, certaines mesures

devraient être adoptées de concert avec cette implantation. L'identification claire des directions à prendre pour accéder aux produits, à la balance et à la sortie du site permettrait d'orienter le trafic sur un tracé mieux circonscrit qui serait alors plus facile à entretenir. Les mesures qui réduisent les déversements de matériaux faciliteraient aussi l'entretien des voies de circulation. La planification de certaines opérations en fonction des conditions météorologiques est aussi une méthode qui peut rendre le contrôle des poussières plus efficace sur le site. Enfin, toutes ces mesures devraient se retrouver dans un document écrit qui permettrait d'établir clairement les pratiques à l'usine et qui faciliterait la formation et la sensibilisation des employés, des sous-traitants et des clients (Mineral Industry Research Organisation, 2012).

CONCLUSION

Au terme de la démarche entamée dans cet ouvrage, il est possible d'affirmer avec une certaine assurance que l'objectif général qui était poursuivi au départ a été atteint. L'entreprise exploitant le site à l'étude est maintenant en mesure de cibler les sources d'émissions les plus importantes et d'identifier les solutions qui seraient les meilleures pour contrôler ces émissions de poussières. Les solutions ayant été présentées et décrites de façon détaillée, une évaluation en toute connaissance de cause peut être réalisée. La démarche de comparaison est suffisamment expliquée pour qu'un exploitant puisse juger de la qualité des recommandations présentées et même choisir d'autres solutions que celles recommandées, sous la base d'autres considérations que celles qui ont été priorisées pour la sélection des meilleures solutions.

La présentation des impacts environnementaux permet d'avoir l'heure juste sur les effets des poussières sur l'environnement et de comprendre leurs modes d'action dans l'environnement. Cette évaluation a été faite en considérant principalement les émissions de poussières de pierre calcaire, mais la majorité des concepts peuvent être appliqués à toute émission de poussières.

En outre, il faut noter que certains aspects ont été laissés de côté. Certaines sources de poussières n'ont pas été considérées dans l'estimation des émissions. Les émissions du forage, du dynamitage, de la taille et du lavage des blocs de pierre ne sont pas considérées dans les modèles utilisés. La gestion du découvert, elle, n'a pas été considérée à cause du manque d'information pour les activités du site à l'étude. Il est alors difficile d'avoir une idée de l'importance de ces sources, bien que l'on sache qu'elles émettent des poussières. L'exploitant devrait donc garder en tête que ces sources devraient aussi être considérées dans un plan de contrôle des poussières. De plus, les estimations de poussières sont faites à partir de modèles qui considèrent que les équipements antipollution sont toujours en état de fonctionnement optimal. Si un exploitant ne maintient pas ses équipements en bon état, il est fort probable que les estimations présentées ne soient pas représentatives et que certaines sources d'émissions soient en réalité beaucoup plus importantes. Enfin, l'identification et l'évaluation des solutions de réduction de poussières a été faite uniquement pour les deux sources qui ont été évaluées

comme étant les plus importantes, soit les voies de circulation et les superficies érodables. Ainsi, dans le cas où ces deux sources les plus importantes étaient contrôlées adéquatement, d'autres sources apparaîtraient proportionnellement plus importantes.

En somme, les suggestions proposées dans ce document ne devraient pas être considérées comme une fin en soi, mais plutôt comme une partie d'un plan plus global qui comprend un ensemble de mesures visant à contrôler les émissions de poussières d'un site. Pour le contrôle des émissions des voies de circulation et des superficies érodables, le document est réputé être très complet, car il rassemble les informations d'une multitude de sources excessivement crédibles sur le sujet. Pour le contrôle des autres sources d'émissions, il faudra consulter d'autres documents d'auteurs qui se sont penchés sur ces questions.

RÉFÉRENCES

- Aber, J.D. et Melillo, J.M. (2001a). Effect of air pollution on terrestrial ecosystems. *In* Aber, J.D. et Melillo, J.M., *Terrestrial Ecosystem* (p. 483-509). Burlington, MA, Harcourt Academic Press.
- Aber, J.D. et Melillo, J.M. (2001b). Soil Development and the soil environment. *In* Aber, J.D. et Melillo, J.M., *Terrestrial ecosystems* (p. 147-167). Burlington, MA, Harcourt Academic Press.
- Adams, J.W. (1988). *Environmental effects of applying lignosulfonate to roads*. Daishowa Chemicals inc. édition, February 1988, p. 1-12.
- Adejumo, J.A., Obioh, I.B., Ogunsola, O.J., Akeredolu, F.A., Olaniyi, H.B., Asubiojo, O.I., Oluwole, A.F., Akanle, O.A. et Spyrou, N.M. (1994). The atmospheric deposition of major, minor and trace elements within and around three cement factories. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 179, n° 2, p. 195-204.
- Andrés, P., Zapater, V. et Pamplona, M. (1996). Stabilization of motorway slopes with herbaceous cover Catalonia, Spain. *Restoration Ecology*, vol. 4, n° 1, p. 51-60.
- Au, D.W.T., Pollino, C.A., Wu, R.S.S., Shin, P.K.S., Lau, S.T.F. et Tang, J.Y.M. (2004). Chronic effects of suspended solids on gill structure, osmoregulation, growth, and triiodothyronine in juvenile green grouper *Epinephelus coioides*. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 266, p. 255-264.
- Avila, A. et Peñuelas, J. (1999). Increasing frequency of Saharan rains over northeastern Spain and its ecological consequences. *Science of the Total Environment*, vol. 228, n° 2-3, p. 153-156.
- Avila, A. et Rodà, F. (2002). Assessing decadal changes in rainwater alkalinity at a rural Mediterranean site in the Montseny Mountains (NE Spain). *Atmospheric Environment*, vol. 36, n° 17, p. 2881-2890.
- Beighley, R.E., He, Y. et Valdes, J.R. (2009). Characterizing potential water quality impacts from soils treated with dust suppressants. *Journal of environmental quality*, vol. 38, n° 2, p. 502-512.
- Bellehumeur, C., Marcotte, D. et Legendre, P. (2000). Estimation of regionalized phenomena by geostatistical methods: Lake acidity on the Canadian Shield. *Environmental Geology*, vol. 39, n° 3-4, p. 211-220.
- Bettencourt, A.F., Neves, C.B., de Almeida, M.S., Pinheiro, L.M., Oliveira, S.A.e., Lopes, L.P. et Castro, M.F. (2010). Biodegradation of acrylic based resins: A review. *Dental Materials*, vol. 26, n° 5, p. e171-e180.
- Bonasoni, P., Cristofanelli, P., Calzolari, F., Bonafè, U., Evangelisti, F., Stohl, A., Sajani, S.Z., van Dingenen, R., Colombo, T. et Balkanski, Y. (2004). Aerosol-ozone correlations during dust transport episodes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 4, n° 5, p. 1201-1215.

- Bouvet, T., Loubet, B., Wilson, J.D. et Tuzet, A. (2007). Filtering of windborne particles by a natural windbreak. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 123, n° 3, p. 481-509.
- Chen, P., Tsai, F.T., Lin, C.K., Yang, C., Chan, C., Young, C. et Lee, C. (2010). Ambient influenza and avian influenza virus during dust storm days and background days. *Environmental health perspectives*, vol. 118, n° 9, p. 1211-1216.
- Cheung, S.G. et Shin, P.K.S. (2005). Size effects of suspended particles on gill damage in green-lipped mussel *Perna viridis*. *Marine pollution bulletin*, vol. 51, n° 8-12, p. 801-810.
- Chevalier, P. (2010). *Technologies d'assainissement et prévention de la pollution*. Télé-université édition, Québec, Québec, Presses de l'Université du Québec, 440 p. (Collection Sciences de l'environnement).
- Ciment Du Saint-Laurent Inc. c. Barrette, Cour Suprême du Canada 1 (Cour Suprême du Canada 2008).
- Claustre, H., Morel, A., Hooker, S.B., Babin, M., Antoine, D., Oubelkheir, K., Bricaud, A., Leblanc, K., Quéguiner, B. et Maritorena, S. (2002). Is desert dust making oligotrophic waters greener? *Geophysical Research Letters*, vol. 29, n° 10, p. 107-1 - 107-4.
- Cong, X.C., Cao, S.Q., Chen, Z.L., Peng, S.T. et Yang, S.L. (2011). Impact of the installation scenario of porous fences on wind-blown particle emission in open coal yards. *Atmospheric Environment*, vol. 45, n° 30, p. 5247-5253.
- Cong, X.C., Yang, S.L., Cao, S.Q., Chen, Z.L., Dai, M.X. et Peng, S.T. (sous presse). Effect of aggregate stockpile configuration and layout on dust emissions in an open yard. *Applied Mathematical Modelling*.
- Conseil canadien des ministres de l'environnement (2003). *Atmospheric science of particulate matter : update in support of the Canada-wide standard for particulate matter and ozone*. MSC Science Assessment and Integration Branch édition, p. 1-83.
- Corporation d'aménagement et de protection de la Sainte-Anne (2006). *Plan directeur de l'eau du bassin versant de la rivière Sainte-Anne*. p. 1-99.
- Coupal, A. (2011). *Graymont (Portneuf) Inc. : Système de gestion de l'environnement*. Boucherville, 1, p. 1-38.
- Dockery, D.W., Pope III, C.A., Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris Jr., B.G. et Speizer, F.E. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *New England Journal of Medicine*, vol. 329, n° 24, p. 1753-1759.
- Dominion enterprises (2012). 2012 Komatsu HD325-7. In Dominion enterprises. *Komatsu Equipment*, [En ligne].
http://www.komatsueq.com/new_vehicle_detail.asp?sid=09336511X5K12K2012J3I21I30JPMQ6956R0&veh=270954&CatDesc=Dump+Trucks&ModelYear=2012v
 (Page consultée le 12 mai 2012).

- Duchesneau, P. (2012). Discussion concernant l'opération de l'usine Graymont (Portneuf). Communication orale. *Entrevue téléphonique entre Maxime Descôteaux et Pierre Duchesneau, surintendant à la production à l'usine de Graymont (Portneuf) inc.* 5 mai, Saint-Marc-des-carrières.
- Dupont, J. (1992). Quebec Lake survey: II. Origin and extent of acidification. *Water, air, and soil pollution*, vol. 61, n° 1-2, p. 125-137.
- Edmeades, D.C., Pringle, R.M., Mansell, G.P. et Shannon, P.W. (1984). Effects of lime on pasture production on soils in the North Island of New Zealand. 1. Introduction and description of data base. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, vol. 27, n° 3, p. 349-356.
- Edvardsson, K., Gustafsson, A. et Magnusson, R. (2012). Dust suppressants efficiency study: In situ measurements of dust generation on gravel roads. *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 13, n° 1, p. 11-31.
- Engelstaedter, S., Tegen, I. et Washington, R. (2006). North African dust emissions and transport. *Earth-Science Reviews*, vol. 79, n° 1-2, p. 73-100.
- Environnement Canada (2005). Sels de voirie : Profile d'abat-poussière à base de chlorure au Canada. In Environnement Canada. *Environnement Canada*, [En ligne]. <http://www.ec.gc.ca/nopp/roadsalt/reports/fr/profile.cfm> (Page consultée le 15 juillet 2012).
- Environnement Canada (2012a). Guide pour les carrières et sablières. In Environnement Canada. *Environnement Canada, Inventaire national des rejets de polluants*, [En ligne]. <http://www.ec.gc.ca/inrp-npri/default.asp?lang=Fr&n=A9C1EE34-1> (Page consultée le 25 mars 2012).
- Environnement Canada (2012b). Archives nationales d'information et de données climatologiques. In Environnement Canada. *Environnement Canada*, [En ligne]. http://www.climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricDataStations_f.html?searchType=stnProx&timeframe=1&txtRadius=50&selCity=46|49|71|13&selPark=&optProxType=custom&txtCentralLatDeg=46&txtCentralLatMin=40&txtCentralLatSec=43&txtCentralLongDeg=72&txtCentralLongMin=3&txtCentralLongSec=4&optLimit=yearRange&StartYear=2010&EndYear=2011&Month=11&Day=1&Year=2011&selRowPerPage=25&cmdProxSubmit=Recherche (Page consultée le 3 mai 2012).
- Environnement carrières et matériaux (2011). *Carrières, poussières et environnement*. UNICEM édition, NRI-B3-11-G, p. 1-87.
- Fagan, M.E. et Peart, D.R. (2004). Impact of the invasive shrub glossy buckthorn (*Rhamnus frangula* L.) on juvenile recruitment by canopy trees. *Forest Ecology and Management*, vol. 194, n° 1-3, p. 95-107.
- Ferreira, A.D. (2011). Structural design of a natural windbreak using computational and experimental modeling. *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 11, n° 5, p. 517-530.

- Ferreira, A.D. et Lambert, R.J. (2011). Numerical and wind tunnel modeling on the windbreak effectiveness to control the aeolian erosion of conical stockpiles. *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 11, n° 1, p. 61-76.
- Fortin, R. (2012). Discussion concernant mesures de réduction des émissions de poussières à l'usine Graymont (Qc) inc. de Bedford. Communication orale. *Entrevue téléphonique entre Maxime Descôteaux et Rosanne Fortin, Technicienne en environnement chez Graymont (Qc) inc.*, 19 juillet, Bedford.
- Galvez-Cloutier, R., Saminathan, S.K.M., Boillot, C., Triffaut-Bouchet, G., Bourget, A. et Soumis-Dugas, G. (2012). An Evaluation of Several In-Lake Restoration Techniques to Improve the Water Quality Problem (Eutrophication) of Saint-Augustin Lake, Quebec, Canada. *Environmental management*, p. 1-17.
- Gambatese, J.A. et James, D.E. (2001). Dust suppression using truck-mounted water spray system. *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 127, n° 1, p. 53-59.
- Gandemer, J. (1979). Wind shelters. *Journal of Industrial Aerodynamics*, vol. 4, n° 3-4, p. 371-389.
- Géo Topo (2011). *Rapport sur l'arpentage des piles - Graymont carrières CALCO Saint-Marc*. Boulianne, T.; Painchaud, J-F édition, p. 1.
- Gillies, J.A., Watson, J.G., Rogers, C.F., DuBois, D., Chow, J.C., Langston, R. et Sweet, J. (1999). Long-term efficiencies of dust suppressants to reduce PM10 emissions from unpaved roads. *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 49, n° 1, p. 3-16.
- Goodrich, B.A., Koski, R.D. et Jacobi, W.R. (2009). Monitoring Surface Water Chemistry Near Magnesium Chloride Dust Suppressant Treated Roads in Colorado. *Journal of environmental quality*, vol. 38, n° 6, p. 2373-2381.
- Google (2012). Google Earth, version 6.2.1.6014 (beta).
- Goudie, A.S. et Middleton, N.J. (2006a). Dust Entrainment, Transport and Deposition. In Goudie, A.S. et Middleton, N.J., *Dust in the global system* (p. 13-31). Oxford, Royaume-Unis, Springer.
- Goudie, A.S. et Middleton, N.J. (2006b). Dust Concentrations, Accumulation and Constituents. In Goudie, A.S. et Middleton, N.J., *Dust in the global system* (p. 147-165). Oxford, Royaume-Unis, Springer.
- Goudie, A.S. et Middleton, N.J. (2006c). Environmental and Human Consequences. In Goudie, A.S. et Middleton, N.J., *Dust in the global system* (p. 33-54). Oxford, Royaume-Unis, Springer.
- Gouvernement du Québec. (2009). *Plan Nord – Pour un développement économique socialement responsable et durable : Document de travail*. Québec, 38 p.

- Grant, P.F. et Nickling, W.G. (1998). Direct field measurement of wind drag on vegetation for application to windbreak design and modelling. *Land Degradation and Development*, vol. 9, n° 1, p. 57-66.
- Grant, R.H. (1985). The influence of the physical attributes of a spruce shoot on momentum transfer. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 36, n° 1, p. 7-18.
- Graymont (Portneuf) (2011). 75 ans Graymont (Portneuf) inc. *Le courrier de Portneuf*, n°1 Mercredi, 14 décembre 2011, p. 1-4.
- Graymont (Portneuf). (2007a). *Schéma de procédé CALCO - 269-899-8101-1*.
- Graymont (Portneuf). (2007b). *Schéma de procédé section bradley et produits industriels SEWCO - 269-899-8101-2*.
- Graymont. (2011a). *Certificate of analysis : High calcium limestone*.
- Graymont. (2011b). *Best management practices for fugitive dust*.
- Graymont (2012a). *Fiche signalétique : calcaire*. p. 1-8.
- Graymont. (2012b). *JDEdwards : Système d'information comptable de Graymont*.
- Grosjean, D., Grosjean, E. et Moreira, L.F.R. (2002). Speciated ambient carbonyls in Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Science and Technology*, vol. 36, n° 7, p. 1389-1395.
- Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (2001). Aerosols, their direct and indirect effects. In Nyenzi, B. et Prospero, J., *Working Group I: The Scientific Basis* (p. 291-348). Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
- Gschösser, F., Wallbaum, H. et Boesch, M.E. (2012). Life-cycle assessment of the production of swiss road materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24, n° 2, p. 168-176.
- Guentert, A. (2012). Discussion concernant le camion-citerne et l'aspirateur de rue à l'usine Graymont de Joliette. Communication orale. *Entrevue téléphonique en Maxime Descôteaux et Angela Guentert, technicienne en environnement à l'usine de Graymont de Joliette.*, 5 août, Joliette, Québec, Canada.
- Guiney, P.D., Woltering, D.M. et Jop, K.M. (1998). An environmental risk assessment profile of two synthetic polymers. *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 17, n° 10, p. 2122-2130.
- Houde, K. (2012). Discussion concernant les mesures de réduction des émissions de poussière à l'usine de Marbleton de Graymont (Qc) inc. Communication orale. *Entretien téléphonique entre Maxime Descôteaux et Keven Houde, Technicien en environnement chez Graymont (Qc) inc.*, 19 juillet, Marbleton.

- Houle, D., Gagnon, C., Couture, S. et Kemp, A. (2004). Recent recovery of lake water quality in Southern Québec following reductions in sulfur emissions. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, vol. 4, n° 2-3, p. 247-261.
- Huszar, P.C. et Piper, S.L. (1986). Estimating the off-site costs of wind erosion in New Mexico. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 41, n° 6, p. 414-416.
- Institut du Nouveau Monde (2012). L'avenir minier du Québec. In Institut du Nouveau Monde. *Institut du Nouveau Monde*, [En ligne]. <http://inm.qc.ca/nos-activites/lavenir-minier-du-quebec.html> (Page consultée le 15 août 2012 2012).
- ISO (2004a). *Système de management environnemental - Exigences et lignes directrices pour son utilisation*. 2^e édition, 34 p. (Collection NORME INTERNATIONALE). (14001-2004).
- ISO (2004b). *Système de management environnemental - Lignes directrices générales concernant les principes, les systèmes et les techniques de mise en oeuvre*. 2^e édition, Genève, Suisse, 54 p. (Collection NORME INTERNATIONALE). (14004-2004).
- Jessen, W. (2007). Alternative Ethanol Fuel Won't Improve Future Air Quality. In Highlight Health. *Highlight Health*, [En ligne]. <http://www.highlighthealth.com/eco-friendly/alternative-ethanol-fuel-wont-improve-future-air-quality/#axzz1HISHZrhF> (Page consultée le mars 21 2011).
- Kalff, J. (2002). Phosphorus Concentrations and Cycling. In Kalf, J. *Limnology* (p. 247-269). Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.
- King, M.H., Cole, B. et King, A. (2012). Limestone: A Crucial and Versatile Industrial Mineral Commodity. In King, M.H., Cole, B. et King, A. *geology.com*, [En ligne]. <http://geology.com/usgs/limestone/> (Page consultée le 14 mai 2012).
- Les Entreprises Bourget (2012). Produits abat-poussière. In Les Entreprises Bourget. *Les Entreprises Bourget*, [En ligne]. <http://www.lesentreprisesbourget.com/> (Page consultée le 15 juillet 2012).
- Li, Y. et Shen, A. (2012). *Gill damage and recovery in juvenile black sea bream Acanthopagrus schlegelii stressed by uncontaminated suspended solids*. Hohhot édition, 5047 p. 518-523. (Collection 1st International Conference on Energy and Environmental Protection, ICEEP 2012).
- Licence libre (2012). *Quantum GIS*, version 1.7.4,
- Loeffler, A.E., Gordon, A.M. et Gillespie, T.J. (1992). Optical porosity and windspeed reduction by coniferous windbreaks in Southern Ontario. *Agroforestry Systems*, vol. 17, n° 2, p. 119-133.
- Loreto, D., Batista, J., Piechota, T. et Singh, V. (2002). Impacts of dust suppressant on the quality of urban runoff from disturbed lands. In Strecker E.W., Huber W.C., Strecker E.W. et Huber W.C., *Proceedings of the Ninth International Conference on: Urban Drainage* (p. 1-18), Portland, OR, 8 September 2002 through 13 September 2002.

- Loyer, J.P. (2012). La survie des vinaigriers plantés à la carrière de l'usine de Graymont à Joliette. Communication orale. *Entrevue entre Maxime Descôteaux et Jean-Pierre Loyer technicien de laboratoire sénior à l'usine Graymont de Joliette*, 15 juin, Joliette.
- Mack Trucks inc. (2012). TD713 6X4 Titan. In Mack Trucks. *Mack Trucks*, [En ligne]. www.macktrucks.com (Page consultée le 3 mai 2012).
- McDonald, R.I., Motzkin, G. et Foster, D.R. (2008). Assessing the influence of historical factors, contemporary processes, and environmental conditions on the distribution of invasive species¹. *Journal of the Torrey Botanical Society*, vol. 135, n° 2, p. 260-271.
- Mcree, P.R. (1984). *An assessment of the effects of road dust on agricultural production systems*. Agricultural Economics Research Unit édition, Canterbury, Nouvelle-Zélande, 156, p. 1-169.
- Midwest Industrial Supply inc. (2012). Soil-sement. In Midwest Industrial Supply inc. *Midwest Industrial Supply inc.*, [En ligne]. <http://www.midwestind.com/products-services/dust-control-products/soil-sement-stabilizer.html> (Page consultée le 15 juillet 2012).
- Mineral Industry Research Organisation (2012). Dust good practice. In Mineral Industry Research Organisation. *Sustainable aggregates*, [En ligne]. http://www.sustainableaggregates.com/sourcesofaggregates/landbased/dust/dustgoodpractice_p1.htm (Page consultée le 26 mars 2012).
- Ministère des Transports du Québec (2003). Principaux abats-poussières et autres usages de ces produits. *INFO DLC*, vol. 8, n° 1, p. 1-2.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parc du Québec (2012). Critères de qualité de l'eau de surface. In Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parc du Québec. *Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parc du Québec*, [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/index.asp (Page consultée le 27 juin 2012).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parc du Québec (2003). *Note d'instruction : Abat-poussières*.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parc du Québec (1999). L'acidité des eaux au Québec. In Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parc du Québec, *Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parc du Québec*, [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/air/pre_acid/brochure/texte1.htm#qualite (Page consultée le 5 juillet 2012).
- Ministry of the Environment of Ontario (2009). *Procedure for Preparing an Emission Summary and Dispersion Modelling (ESDM) Report*. Standards Development Branch édition, Toronto, Canada, PIBs # 3614e03, p. 1-131.

- Minnesota Department of Transportation (2009). *Best practices for dust control on aggregate roads*. Eddie N. Johnson and Roger C. Olson édition, Maplewood, Minnesota, MN/RC 2009-04, p. 1-54.
- Mody, V. et Jakhete, R. (1988). *Dust control handbook*. Westwood, NJ, Noyes Publication, 161. (Collection Pollution technology review).
- Moreno-de las Heras, M., Merino-Martín, L. et Nicolau, J.M. (2009). Effect of vegetation cover on the hydrology of reclaimed mining soils under Mediterranean-Continental climate. *Catena*, vol. 77, n° 1, p. 39-47.
- Moreno-Peñaranda, R., Lloret, F. et Alcañiz, J.M. (2004). Effects of sewage sludge on plant community composition in restored limestone quarries. *Restoration Ecology*, vol. 12, n° 2, p. 290-296.
- Muleeki, G.E. et Cowherd, C. (1987). *Evaluation of the effectiveness of chemical dust suppressants on unpaved roads*. Muleeki, G. E.; Cowherd, C. édition, Research Triangle Park, NC, EPA/600/2-87/102, p. 1-6.
- Music, B. et Caya, D. (2007). Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi River Basin a simulated by the Canadian regional climate model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology*, vol. 8, n° 5, p. 969-988.
- Nanos, G.D. et Ilias, I.F. (2007). Effects of inert dust on olive (*Olea europaea* L.) leaf physiological parameters. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 14, n° 3, p. 212-214.
- National Institute for Occupational Safety and Health (2003). *Handbook for dust control in mining*. U.S. Department of health and human services édition, Pittsburg, PA, IC9465, p. 1-132.
- Nel, A. (2005). Air pollution-related illness: Effects of particles. *Science*, vol. 308, n° 5723, p. 804-806.
- New-Zealand Ministry for the Environment (2001). *Good practice guide for assessing and managing the environmental effects of dust emissions*. New-Zealand Ministry for the Environment édition, Wellington, Nouvelle-Zélande, 409, p. 1-66.
- Olaleye, V.F. et Oluyemi, E.A. (2010). Effects of cement flue dusts from a Nigerian cement plant on air, water and planktonic quality. *Environmental monitoring and assessment*, vol. 162, n° 1-4, p. 153-162.
- Olivier, M. (2009). L'hydrosphère. In Olivier, M. *Chimie de l'environnement* (p. 7-60). Lévis (Québec) Canada, Les production Jacques Bernier.
- Pauley, P.M., Baker, N.L. et Barker, E.H. (1996). An observational study of the "Interstate 5" dust storm case. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 77, n° 4, p. 693-720.
- Pellerin, G., Barchman, G., Beaulieu, B., Brisson, M., Éthier, J. et Philip de Laborie, G. (1993). *Répertoire des arbres et arbustes utilisés à proximité des équipements*

- d'Hydro-Québec. Hydro-Québec, Vice-présidence Environnement édition, Montréal, Québec, 960 p.
- Pope III, C.A., Ezzati, M. et Dockery, D.W. (2009). Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States. *New England Journal of Medicine*, vol. 360, n° 4, p. 376-386.
- Pour que le Québec ait meilleure mine (2012). Coalition Pour que le Québec ait meilleure mine. *In* Pour que le Québec ait meilleure mine. *Coalition Pour que le Québec ait meilleure mine*, [En ligne]. <http://www.quebecmeilleuremine.org/> (Page consultée le 19 août 2012).
- Psenner, R. (1999). Living in a dusty world : Airborne dust as a key factor for alpine lakes. *Water Air and Soil Pollution*, vol. 112, p. 217-227.
- Rantec Corporation (2012). Guardian. *In* Rantec Corporation. *Rantec Corporation*, [En ligne]. <http://www.ranteccorp.com/products/erosion-control/guardian/> (Page consultée le 15 juillet 2012).
- Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (2011). R.R.Q., c. Q-2 r. 4.1.
- Règlement sur les matières dangereuses (1997). R.R.Q., c. Q-2, r. 32.
- Roe, D.C. (2003). Recent innovations in controlling dust emissions in the bauxite/alumina industry. *In* Crepeau P.N., *Light Metals 2003: Proceedings of the technical sessions presented by the TMS Aluminium Committee at the 132nd TMS Annual Meetings* (p. 147-151), San Diego, CA, 2 March 2003 through 6 March 2003.
- Rosenfeld, M., Marom, G. et Bitan, A. (2010). Numerical simulation of the airflow across trees in a windbreak. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 135, n° 1, p. 89-107.
- Rubio, M.C., Martínez, G., Baena, L. et Moreno, F. (2012). Warm Mix Asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, vol. 24, p. 76-84.
- Saarenketo, T. (1998). Electrical properties of water in clay and silty soils. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 40, n° 1-3, p. 73-88.
- Samet, J.M., Dominici, F., Curriero, F.C., Coursac, I. et Zeger, S.L. (2000). Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994. *New England Journal of Medicine*, vol. 343, n° 24, p. 1742-1749.
- San Diego State University (2004). *Runoff Characteristics and Sediment Retention Under Simulated Rainfall Conditions*. Soil erosion research laboratory édition, San Diego, CA, 2004-01-RAN, p. 1-26.
- Sandberg, T. (2001). *Heavy Truck Modeling for Fuel Consumption Simulations and Measurements*. Doctorat, Linköping University, Linköping, Suède, 1 p.
- Sanders, J.E. et Friedman, G.M. (1967). Origin and occurrence of limestones. *In* Fairbridge, R.W., Bissel, H.J. et Chilingar, G.V., *Carbonate rocks* (p. 169-266). Amsterdam, Pays-Bas, Elsevier.

- Sanders, T.G., Addo, J.Q., Ariniello, A. et Heiden, W.F. (1997). Relative effectiveness of road dust suppressants. *Journal of Transportation Engineering*, vol. 123, n° 5, p. 393-397.
- Shapiera, M., Jeziorski, A., Paterson, A.M. et Smol, J.P. (2012). Cladoceran response to calcium decline and the subsequent inadvertent liming of a softwater canadian lake. *Water, air, and soil pollution*, vol. 223, n° 5, p. 2437-2446.
- Sillick, M. et Gregson, C.M. (2010). Critical water activity of disaccharide/maltodextrin blends. *Carbohydrate Polymers*, vol. 79, n° 4, p. 1028-1033.
- Smith, E.A., Prues, S.L. et Oehme, F.W. (1997). Environmental degradation of polyacrylamides. II. Effects of environmental (outdoor) exposure. *Ecotoxicology and environmental safety*, vol. 37, n° 1, p. 76-91.
- Société de l'industrie minérale (2008). *Guide de l'exploitant : empoussiérage, dépoussiérage*. Mines & Carrières, vol. Hors-Série 3, n° 152, p. 1-96.
- Steffens, J.T., Wang, Y.J. et Zhang, K.M. (2012). Exploration of effects of a vegetation barrier on particle size distributions in a near-road environment. *Atmospheric Environment*, vol. 50, p. 120-128.
- Stunder, B.J.B. et Arya, S.P.S. (1988). Windbreak effectiveness for storage pile fugitive dust control: A wind tunnel study. *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 38, n° 2, p. 135-143.
- Sughar, J. (2012). Le jus de betterave comme abat-poussière. Communication orale. *Entrevue téléphonique et échange de courriel entre Maxime Descôteaux et Joel Sughar, représentant de vente chez Éco-Forma inc., 23 juillet, Montréal.*
- Tessier, A. (2012). Conversation concernant les poussières à Graymont (Portneuf). Communication orale. *Entrevue entre Maxime Descôteaux et André Tessier, responsable santé et sécurité et environnement à Graymont (Portneuf) inc., 15 mai, Saint-Marc-des-Carrières.*
- Thompson, R.J. et Visser, A.T. (2007). Selection, performance and economic evaluation of dust palliatives on surface mine haul roads. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 107, n° 7, p. 435-450.
- Thompson, R.J., Visser, A.T. et Heyns, P.S. (2004). Integrating Real-time Mine Haul Road Maintenance Management with Mine-wide Asset Location and Communication Systems. *6th International Conference on Managing Pavements*, p. 1-9.
- Toon, O.B. (2003). African dust in Florida clouds. *Nature*, vol. 424, n° 6949, p. 623-624.
- Torno, S., Toraño, J., Menéndez, M., Gent, M. et Álvarez, I. (2011). Experimental and numerical study of fence effects on dust emission into atmosphere from open storage piles. *Journal of Central South University of Technology (English Edition)*, vol. 18, n° 2, p. 411-419.
- Tozer, P.R. (2012). *The cost of Red dawn to the NSW economy*. University of New England and PRT Consulting édition, Fremantle, p. 1-27.

- Trou Story* (2011). Richard Desjardins et Robert Monderie, réalisateurs, Office National du Film du Canada, présentation en salle.
- United States Environmental Protection Agency (1987). *Emission Control Technologies and Emission Factors for Unpaved Road Fugitive Emissions*. Center for Environmental Research Information édition, Cincinnati, OH, EPA/625/5-87/022, p. 1-54.
- United States Environmental Protection Agency (2002). *Potential Environmental Impacts of Dust Suppressants: "Avoiding Another Times Beach"*. Las Vegas, Nevada, EPA/600/R-04/031, p. 1-97.
- United States Environmental Protection Agency (2004). *Particulate Matter Research Program : Five Years of Progress*. Office of Research and Development édition, Washington, DC, EPA 600/R-04/058, p. 1-208.
- United States Environmental Protection Agency (2006a). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. US Environmental Protection Agency édition, AP-42, p. 1.
- United States Environmental Protection Agency (2006b). 11.19.2 Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing. *In* USEPA, *Compilation of air pollutant factors* (p. 11.19.2-1-11.19.2-17). Research triangle park, NC, Office of air quality planning and Standards.
- United States Environmental Protection Agency (2006c). 11.19.1 Sand And Gravel Processing. *In* USEPA, *Compilation of air pollutant factors* (p. 11.19.1-1-11.19.1-8). Research triangle park, NC, Office of air quality planning and Standards.
- United States Environmental Protection Agency (2006d). 13.2.4 Aggregate Handling And Storage Piles. *In* USEPA, *Compilation of air pollutant factors* (p. 13.2.4-1-13.2.4-6). Research triangle park, NC, Office of air quality planning and Standards.
- United States Environmental Protection Agency (2006e). 13.2.2 Unpaved Roads. *In* USEPA, *Compilation of air pollutant factors* (p. 13.2.2-1-13.2.2-20). Research triangle park, NC, Office of air quality planning and Standards.
- United States Environmental Protection Agency (2006f). APPENDIX C.1. *In* USEPA, *Compilation of air pollutant factors* (p. C.1-1-C.1-13). Research triangle park, NC, Office of air quality planning and Standards.
- United States Environmental Protection Agency (2006g). APPENDIX C.2. *In* USEPA, *Compilation of air pollutant factors* (p. C.2-1-C.2-9). Research triangle park, NC, Office of air quality planning and Standards.
- Van Renterghem, T. et Botteldooren, D. (2012). On the choice between walls and berms for road traffic noise shielding including wind effects. *Landscape and Urban Planning*, vol. 105, n° 3, p. 199-210.
- Western Regional Air Partnership (2006). *WRAP Fugitive Dust Handbook*. Countess Environmental édition, Westlake Village, CA, WGA Contract No. 30204-111, p. 1-244.

- Westphal, H. (2006). Limestone-marl alternations as environmental archives and the role of early diagenesis: A critical review. *International Journal of Earth Sciences*, vol. 95, n° 6, p. 947-961.
- Williams, P. et Young, M. (1999). *Costing Dust: How much does wind erosion cost the people of South Australia*. CSIRO Land and Water, Policy and Economic Research Unit édition, p. 1-36.
- Wisconsin Transportation Information Center (1997). *Dust control on unpaved roads*. Wisconsin Transportation Bulletin, vol. 13, p. 1-6.
- Yeh, C., Tsai, C. et Yang, R. (2010). An investigation into the sheltering performance of porous windbreaks under various wind directions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 98, n° 10-11, p. 520-532.
- Zhan, S. et Cong, X. (2008). Prediction on dynamical effect of tree belts in mine area. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, vol. 33, n° 9, p. 997-1001.
- Zhao, Y. et Zhao, C. (2012). *Research on the purification ability of porous asphalt pavement to runoff pollution*. Hangzhou édition, 2439 p. 446-449. (Collection 2nd International Conference on Structures and Building Materials, ICSBM 2012).

BIBLIOGRAPHIE

- Abdul-Wahab, S.A. (2006). Impact of fugitive dust emissions from cement plants on nearby communities. *Ecological Modelling*, vol. 195, n° 3-4, p. 338-348.
- Aggarwal, A.L., Maji, C.S. et Thakre, R. (1988). Impact of fugitive emissions on ambient air quality status and regulatory requirements of emission standards in cement industry. *Journal of the Institution of Engineers (India): Environmental Engineering Division*, vol. 69 pt 1, p. 32-35.
- Al-Busaltan, S., Al Nageim, H., Atherton, W. et Sharples, G. (2012). Green Bituminous Asphalt relevant for highway and airfield pavement. *Construction and Building Materials*, vol. 31, p. 243-250.
- Amato, F., Querol, X., Johansson, C., Nagl, C. et Alastuey, A. (2010). A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods. *Science of the Total Environment*, vol. 408, n° 16, p. 3070-3084.
- Australia Government, Department of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities (2012). *Emission Estimation Technique Manual for Fugitive Emissions*. Australia Government édition, Australie, 2.0, p. 1-49.
- Badr, T. et Harion, J.L. (2005). Numerical modelling of flow over stockpiles: Implications on dust emissions. *Atmospheric Environment*, vol. 39, n° 30, p. 5576-5584.
- Bae, S., Inyang, H.I., De Brito Galvão, T.C. et Mbamalu, G.E. (2006). Soil desiccation rate integration into empirical dust emission models for polymer suppressant evaluation. *Journal of hazardous materials*, vol. 132, n° 1 SPEC. ISS., p. 111-117.
- Berger, J. et Denby, B. (2011). A generalised model for traffic induced road dust emissions. Model description and evaluation. *Atmospheric Environment*, vol. 45, n° 22, p. 3692-3703.
- Bitog, J.P., Lee, I., Shin, M., Hong, S., Hwang, H., Seo, I., Yoo, J., Kwon, K., Kim, Y. et Han, J. (2009). Numerical simulation of an array of fences in Saemangeum reclaimed land. *Atmospheric Environment*, vol. 43, n° 30, p. 4612-4621.
- Bolan, N.S., Hedley, M.J. et White, R.E. (1991). Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures. *Plant and Soil*, vol. 134, n° 1, p. 53-63.
- Chin, M. (2009). *Dust emission, transport, and effects on air quality : A global model simulation and comparison with multiplatform data*. NASA édition, Goddard Space Flight Center, USA, p. 1-22.
- Cho, A.K., Sioutas, C., Miguel, A.H., Kumagai, Y., Schmitz, D.A., Singh, M., Eiguren-Fernandez, A. et Froines, J.R. (2005). Redox activity of airborne particulate matter at different sites in the Los Angeles Basin. *Environmental research*, vol. 99, n° 1, p. 40-47.

- Copeland, C.R., Eisele, T.C., Chesney, D.J. et Komar Kawatra, S. (2008). Factors influencing dust suppressant effectiveness. *Minerals and Metallurgical Processing*, vol. 25, n° 4, p. 215-222.
- Daher, N., Ruprecht, A., Invernizzi, G., De Marco, C., Miller-Schulze, J., Heo, J.B., Shafer, M.M., Shelton, B.R., Schauer, J.J. et Sioutas, C. (2012). Characterization, sources and redox activity of fine and coarse particulate matter in Milan, Italy. *Atmospheric Environment*, vol. 49, p. 130-141.
- Darmenova, K. et Sokolik, I.N. (2007). Assessing uncertainties in dust emission in the Aral Sea region caused by meteorological fields predicted with a mesoscale model. *Global and Planetary Change*, vol. 56, n° 3-4, p. 297-310.
- Druide Informatique (2008). Antidote RX, version 8,
- Duan, Z., Shi, W., Zheng, W. et Zong, R. (2010). Progress in dust-removing mechanism study and engineering application of porous fence. *Petrochemical Equipment*, vol. 39, n° 3, p. 40-44.
- Edvardsson, K. et Magnusson, R. (2011). Impact of fine materials content on the transport of dust suppressants in gravel road wearing courses. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, n° 8, p. 1163-1170.
- Environment Australia (2000). *Emission estimation technique manual for mining and processing of non-metallic minerals*. Environment Australia édition, Australie, 2.0, p. 1-84.
- Etyemezian, V., Kuhns, H., Gillies, J., Chow, J., Hendrickson, K., McGown, M. et Pitchford, M. (2003). Vehicle-based road dust emission measurement (III): Effect of speed, traffic volume, location, and season on PM10 road dust emissions in the Treasure Valley, ID. *Atmospheric Environment*, vol. 37, n° 32, p. 4583-4593.
- Faschingleitner, J. et Höflinger, W. (2011). Evaluation of primary and secondary fugitive dust suppression methods using enclosed water spraying systems at bulk solids handling. *Advanced Powder Technology*, vol. 22, n° 2, p. 236-244.
- Gaffney, J.S. et Marley, N.A. (2005). *Urban Aerosols and Their Impacts : Lessons Learned from the World Trade Center Tragedy*. Oxford University Press édition, Washington, DC, American Chemical Society, 384 p. (0841239169).
- Gillies, J.A., Etyemezian, V., Kuhns, H., Nikolic, D. et Gillette, D.A. (2005). Effect of vehicle characteristics on unpaved road dust emissions. *Atmospheric Environment*, vol. 39, n° 13, p. 2341-2347.
- Goodrich, B.A. et Jacobi, W.R. (2012). Foliar damage, ion content, and mortality rate of five common roadside tree species treated with soil applications of magnesium chloride. *Water, air, and soil pollution*, vol. 223, n° 2, p. 847-862.
- Grantz, D.A., Vaughn, D.L., Farber, R.J., Kim, B., Ashbaugh, L., VanCuren, T. et Campbell, R. (1998). Wind barriers suppress fugitive dust and soil-derived airborne particles in arid regions. *Journal of environmental quality*, vol. 27, n° 4, p. 946-952.

- Graymont (2010). *Best management practices plan for the control of fugitive dust emissions*. Pottinger Gaherty Environmental Consultants Ltd. édition, Vancouver, BC, PGL File: 2184-07.02, p. 1-41.
- Huang, C., Lee, C. et Tsai, C. (2005). Reduction of particle reentrainment using porous fence in front of dust samples. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 131, n° 12, p. 1644-1648.
- IBM Corp. (2005). COGNOS,
- Kinsey, J.S., Linna, K.J., Squier, W.C., Muleski, G.E. et Cowherd Jr., C. (2004). Characterization of the fugitive particulate emissions from construction mud/dirt carryout. *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 54, n° 11, p. 1394-1404.
- Korcz, M., Fudała, J. et Kliś, C. (2009). Estimation of wind blown dust emissions in Europe and its vicinity. *Atmospheric Environment*, vol. 43, n° 7, p. 1410-1420.
- Kumar, S.S., Singh, N.A., Kumar, V., Sunisha, B., Preeti, S., Deepali, S. et Nath, S.R. (2008). Impact of dust emission on plant vegetation in the vicinity of cement plant. *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 7, n° 1, p. 31-35.
- Landhäusser, S.M. et Lieffers, V.J. (2001). Photosynthesis and carbon allocation of six boreal tree species grown in understory and open conditions. *Tree physiology*, vol. 21, n° 4, p. 243-250.
- Lee, S. et Park, C. (2000). The shelter effect of porous wind fences on coal piles in POSCO open storage yard. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 84, n° 1, p. 101-118.
- Lee, S. et Park, C. (1999). Surface pressure characteristics on a triangular prism located behind a porous fence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 80, n° 1-2, p. 69-83.
- Lin, C. et Yeh, J. (2007). Estimating dust emission from a sandbank on the downstream Jhuoshuei River under strong wind conditions. *Atmospheric Environment*, vol. 41, n° 35, p. 7553-7561.
- McKenna Neuman, C., Boulton, J.W. et Sanderson, S. (2009). Wind tunnel simulation of environmental controls on fugitive dust emissions from mine tailings. *Atmospheric Environment*, vol. 43, n° 3, p. 520-529.
- Ministry for health of New South Wales, Australia (2006). *Mine dust and you*. Australia, SHPN (EHB) 050177, p. 1-2.
- Obiajunwa, E.I. et Nwachukwu, J.I. (2000). Elemental analysis of limestone samples from Ewekoro limestone deposit in southwest Nigeria. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 170, n° 3, p. 427-431.

- Park, C. et Lee, S. (2002). Verification of the shelter effect of a windbreak on coal piles in the POSCO open storage yards at the Kwang-Yang works. *Atmospheric Environment*, vol. 36, n° 13, p. 2171-2185.
- Park, S.H., Gong, S.L., Gong, W., Makar, P.A., Moran, M.D., Zhang, J. et Stroud, C.A. (2010). Relative impact of windblown dust versus anthropogenic fugitive dust in PM_{2.5} on air quality in North America. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, vol. 115, n° 16,
- Pierre, C., Bergametti, G., Marticorena, G., Mougin, E., Bouet, C. et Schmechtig, C. (2012). Impact of vegetation and soil moisture seasonal dynamics on dust emissions over the Sahel. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, vol. doi:10.1029/2011JD016950, in press,
- Poorter, H., Niklas, K.J., Reich, P.B., Oleksyn, J., Poot, P. et Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, vol. 193, n° 1, p. 30-50.
- Raupach, M.R., Woods, N., Dorr, G., Leys, J.F. et Cleugh, H.A. (2001). The entrapment of particles by windbreaks. *Atmospheric Environment*, vol. 35, n° 20, p. 3373-3383.
- Roney, J.A. et White, B.R. (2010). Comparison of a two-dimensional numerical dust transport model with experimental dust emissions from soil surfaces in a wind tunnel. *Atmospheric Environment*, vol. 44, n° 4, p. 512-522.
- Roney, J.A. et White, B.R. (2006). Estimating fugitive dust emission rates using an environmental boundary layer wind tunnel. *Atmospheric Environment*, vol. 40, n° 40, p. 7668-7685.
- Santacatalina, M., Reche, C., Minguillón, M.C., Escrig, A., Sanfelix, V., Carratalá, A., Nicolás, J.F., Yubero, E., Crespo, J., Alastuey, A., Monfort, E., Miró, J.V. et Querol, X. (2010). Impact of fugitive emissions in ambient PM levels and composition. A case study in Southeast Spain. *Science of the Total Environment*, vol. 408, n° 21, p. 4999-5009.
- Stepanek, L.J. et Harrell, M.O. (2000). Short communication: Mortality of seedling windbreak trees caused by a common sunflower insect isophrictis similiella (chambers) (Lepidoptera: Gelechiidae). *Journal of the Kansas Entomological Society*, vol. 73, n° 2, p. 123-125.
- Sweeney, D.D., Slagley, J.M., Smith, D.A. et Rider, J.P. (2009). Controlling dust exposures in longwall mining utilizing a simple barrier. *Mining Engineering*, vol. 61, n° 12, p. 58-61.
- Sweeney, M.R., McDonald, E.V. et Etyemezian, V. (2011). Quantifying dust emissions from desert landforms, eastern Mojave Desert, USA. *Geomorphology*, vol. 135, n° 1-2, p. 21-34.
- Tegen, I. (2005). *Soil dust emission*. Institute for tropospheric research édition, Leipzig, Allemagne, p. 1-36.

- Torno, S., Rodriguez, R., Allende, C. et Toraño, J. (2010). Dust emission reduction for open storage mineral piles by fences: CFD modelling. *In* Anonyme, *18th International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution, Air Pollution 2010* (p. 121-128), Kos, 21 June 2010 through 23 June 2010.
- Torno, S., Toraño, J., Diego, I., Menéndez, M., Gent, M. et Velasco, J. (2009). CFD simulation with multiphase flows in porous media and open mineral storage pile. *In* Anonyme, *5th International Conference on Computational and Experimental Methods in Multiphase and Complex Flow, Multiphase Flow 2009* (p. 421-430), New Forest, 15 June 2009 through 17 June 2009.
- Turpin, C. et Harion, J.L. (2009). Effects of flattening the stockpile crest and of the presence of buildings on dust emissions from industrial open storage systems. *In* Anonyme, *17th International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution, Air Pollution 2009* (p. 419-430), Tallinn, 20 July 2009 through 22 July 2009.
- Turpin, C. et Harion, J. (2009). Numerical modeling of flow structures over various flat-topped stockpiles height: Implications on dust emissions. *Atmospheric Environment*, vol. 43, n° 35, p. 5579-5587.
- Ullmann, A. et Dayan, A. (1998). Exhaust volume model for dust emission control of belt conveyor transfer points. *Powder Technology*, vol. 96, n° 2, p. 139-147.
- United States Environmental Protection Agency (2004). *Particulate Matter Research Program : Five Years of Progress*. Office of Research and Development édition, Washington, DC, EPA 600/R-04/058, p. 1-208.
- Urban, F.E., Reynolds, R.L. et Fulton, R. (2009). The dynamic interaction of climate, vegetation, and dust emission, Mojave Desert, USA. *In* Fernandez-Bernal, A. et De La Rosa, M. A., *Arid Environments and Wind Erosion* (p. 1-25). Nova Science Publishers.
- Vrins, E. (1996). Sampling requirements for estimating fugitive dust emissions. *Journal of Aerosol Science*, vol. 27, n° SUPPL.1, p. S71-S72.
- Wang, Y., Zhou, J. et Xu, Z. (2003). Numerical simulation of flow fields through porous windbreak in shrubby zone. *Chinese Journal of Applied Ecology*, vol. 14, n° 3, p. 359-362.
- Williams, D.S., Shukla, M.K. et Ross, J. (2008). Particulate matter emission by a vehicle running on unpaved road. *Atmospheric Environment*, vol. 42, n° 16, p. 3899-3905.
- Wilson, J.D. (2005). Deposition of particles to a thin windbreak: The effect of a gap. *Atmospheric Environment*, vol. 39, n° 30, p. 5525-5531.
- World Health Organisation (2009). A review of human carcinogens - Part C : metals, arsenic, dusts, and fibres. *The lancet oncology*, vol. 10, n° may, p. 453-454.
- Xu, X., Guo, L., Han, W. et Jia, D. (2011). The performance of low-carbon environmental warm MIX asphalt. *In* Anonyme, *3rd International Conference on Transportation*

Engineering, ICTE 2011 (p. 1849-1852), Chengdu, 23 July 2011 through 25 July 2011.

Xuan, J. (2004). Turbulence factors for threshold velocity and emission rate of atmospheric mineral dust. *Atmospheric Environment*, vol. 38, n° 12, p. 1777-1783.

Yu, B. et Lu, Q. (2012). Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 17, n° 5, p. 380-388.

Zhang, N., Chen, T. et Lee, S. (2011). Wind tunnel observation on the effect of a porous fence on shelter of a triangular coal pile. *Shiyan Liuti Lixue/Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, vol. 25, n° 4, p. 50-54.

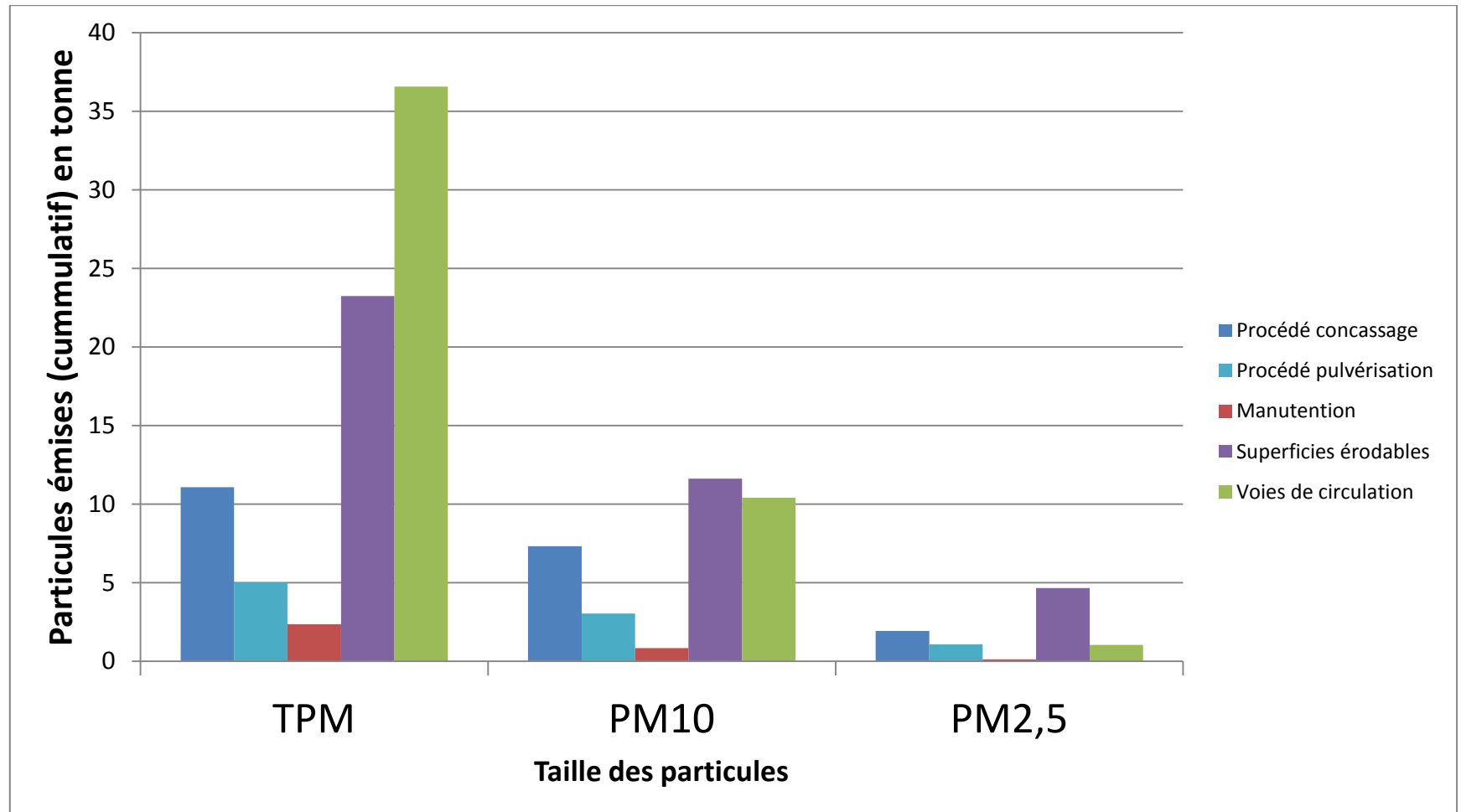
Zhou, L., Kim, E., Hopke, P.K., Stanier, C. et Pandis, S.N. (2005). Mining airborne particulate size distribution data by positive matrix factorization. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, vol. 110, n° 7, p. 1-15.

ANNEXE 1 – DÉFINITION DE LA COTE GLOBALE OCTROYÉE AUX IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

La caractérisation des impacts environnementaux présentée au tableau 1.1 se base sur les critères proposés par la norme ISO 14 004-2004 (ISO, 2004b) et qui, pour les fins de la caractérisation du présent document, sont définis comme suit : le type (positif ou négatif), la sévérité (altération légère, moyenne ou totale d'un élément de l'environnement), l'étendue (locale (<10 km), régionale (<100 km) ou nationale >100 km) et la durée (court, moyen ou long terme). Ainsi, sauf pour le type d'impact qui est dichotomique, chacun des autres critères comporte trois niveaux, qui ont été évalués et cotés de 0 à 2 pour chacun des impacts. 0 correspond à l'impact le plus faible, 2 au plus élevé. Les cotes attribuées ont permis d'établir une cote d'impact global. C'est la cote qui est présentée au tableau 1.1. Cette cote est établie en additionnant, pour chacun des impacts environnementaux, la cote de 0 à 2 qui est attribuée pour chaque caractéristique. Cela donne donc un total entre 0 et 6. Des intervalles sont alors établis pour associer ce total à un niveau d'impact global. Ces intervalles sont établis comme suit :

- 1 = Faible
- 2-3 = Moyen
- 4-5 = Élevé
- 6 = Catastrophique

ANNEXE 2 – ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES DU SITE À L'ÉTUDE PAR ACTIVITÉ (2011)



ANNEXE 3 – ÉMISSION DE POUSSIÈRES DU SITE À L'ÉTUDE POUR LE PROCÉDÉ DE CONCASSAGE (2011)

