

PROPOSITION D'UNE SOLUTION TECHNOLOGIQUE POUR LE CONTRÔLE DE LA POUSSIÈRE PROVENANT
DE LA MANUTENTION DE LA PIERRE PAR CONVOYEUR

Par
Pascale Fortin-Richard

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Monsieur Alexandre Renaud

MAITRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Juin 2015

SOMMAIRE

Mots clés : poussière, particule, manutention, pierre calcaire, convoyeur à courroie, transfert, étanchement.

L'objectif de cet essai est de recommander une solution optimale pour le contrôle de la poussière à l'usine de Graymont à Marbleton, au Québec, lors de la manutention de la pierre calcaire dans le secteur de concassage et de tamisage. La manutention se fait par convoyeurs à courroie et les points de transfert entre ceux-ci sont une source d'émission de poussière. La poussière est un polluant ayant plusieurs impacts notamment sur la santé respiratoire et sous forme de nuisances au voisinage. Elle entraîne également des impacts économiques importants, autant pour le producteur que pour le voisinage. C'est pourquoi il est nécessaire de contrôler les émissions de poussière, de manière à minimiser ces impacts.

Une recherche et une analyse des solutions applicables ont été effectuées. Les critères d'efficacité, de maturité, de coût, d'impact sur les opérations et la maintenance et d'impact sur l'environnement et la santé et la sécurité ont été utilisés pour comparer entre elles les solutions. La solution la plus avantageuse consiste à installer des convoyeurs étanches aux points de transfert entre convoyeurs et des goulottes télescopiques dépoussiérées aux points de transfert vers les empilements. Cette solution l'emporte sur le dépoussiérage central typiquement utilisé en raison des coûts moindres, de son efficacité potentiellement supérieure et de sa passivité. Il reste néanmoins à tester la longueur appropriée de convoyeurs étanches à installer pour atteindre la performance de contrôle de poussière souhaitée.

REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord remercier mon directeur d'essai, Alexandre Renaud, pour sa confiance, sa franchise et son appui, tout au long de la réalisation de ce travail.

Merci également à ma famille, dont le soutien fut indispensable tout au long de mes études qui s'achèvent maintenant. Votre écoute, vos conseils, votre présence et votre amour sont pour moi une source d'énergie et de motivation qui me permet de continuer d'avancer et de me dépasser à chaque nouveau défi.

Merci à tous mes collègues de la maîtrise en environnement avec qui j'ai pu partager mes questionnements, inquiétudes et idées et pour tout ce que j'ai appris en vous côtoyant.

Finalement, j'aimerais remercier mon conjoint Francis de m'avoir accompagnée au travers de cette étape. Merci d'avoir partagé les bons comme les mauvais moments et de m'avoir supporté pour cet essai et dans tout le reste de ma vie. Ta présence m'a permis de profiter du moment présent et d'apprécier pleinement cette dernière session avant de commencer avec beaucoup d'enthousiasme les prochaines étapes de nos vies.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1 PROBLÉMATIQUE	3
1.1 Description du lieu d'étude et mandat.....	3
1.2 Terminologie et concepts clés	4
1.2.1 Classification des matières particulières	4
1.2.2 Convoyeurs à courroie.....	4
1.3 Cadre législatif	5
1.4 La pollution par les particules.....	7
1.4.1 Portrait mondial.....	8
1.4.2 Portrait du Canada.....	9
1.5 La production de matière particulaire par la manutention de la pierre.....	11
1.5.1 Les mécanismes de production	11
1.5.2 La matière particulaire générée	13
2 IMPACTS.....	15
2.2 Impacts environnementaux.....	15
2.3 Impacts sociaux.....	17
2.3.1 Impacts sur la santé	17
2.3.2 Impact sur la sécurité.....	18
2.3.3 Nuisances	19
2.4 Impacts économiques.....	19
2.4.1 Coûts liés aux soins de santé	19
2.4.2 Nuisances.....	20
2.4.3 Autres impacts économiques	21
3 MÉTHODOLOGIE	23
3.2 Identification des solutions technologiques potentielles.....	23
3.3 Méthodologie d'analyse	25
3.3.1 L'efficacité.....	26

3.3.2	La maturité.....	26
3.3.3	Le coût.....	27
3.3.4	L'impact sur les opérations et sur la maintenance.....	29
3.3.5	L'impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité	29
3.4	Comparaison des solutions.....	30
4	ANALYSE DES SOLUTIONS	31
4.2	Dépoussiérage central	31
4.2.1	Efficacité	32
4.2.2	Maturité.....	33
4.2.3	Coût.....	33
4.2.4	Impact sur les opérations et la maintenance	34
4.2.5	Impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité.....	34
4.2.6	Variantes.....	35
4.3	Dépoussiérage par unités autonomes	37
4.3.1	Efficacité	37
4.3.2	Maturité.....	38
4.3.3	Coût.....	38
4.3.4	Impact sur les opérations et la maintenance	38
4.3.5	Impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité.....	39
4.4	Utilisation de convoyeurs étanches doubles	39
4.4.1	Efficacité	41
4.4.2	Maturité.....	41
4.4.3	Coût.....	41
4.4.4	Impact sur les opérations et la maintenance	43
4.4.5	Impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité.....	43
4.5	Convoyeurs étanches simples.....	44
4.5.1	Efficacité	45
4.5.2	Maturité.....	46
4.5.3	Coût.....	46
4.5.4	Impact sur les opérations et la maintenance	47
4.5.5	Impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité.....	47

4.6	Abat-poussière chimique	47
4.6.1	Efficacité	48
4.6.2	Maturité.....	48
4.6.3	Coût.....	49
4.6.4	Impact sur les opérations et la maintenance	49
4.6.5	Impact sur l’environnement et sur la santé et la sécurité.....	50
4.7	Les jets d’eau	51
4.7.1	Efficacité	52
4.7.2	Maturité.....	53
4.7.3	Coût.....	53
4.7.4	Impact sur les opérations et la maintenance	54
4.7.5	Impact sur l’environnement et sur la santé et la sécurité.....	55
4.8	Les diffuseurs circulaires à eau	55
4.8.1	Efficacité	56
4.8.2	Maturité.....	56
4.8.3	Coût.....	56
4.8.4	Impact sur les opérations et la maintenance	57
4.8.5	Impact sur l’environnement et sur la santé et la sécurité.....	57
4.9	Goulottes télescopiques	57
4.9.1	Efficacité	58
4.9.2	Maturité.....	58
4.9.3	Coût.....	59
4.9.4	Impact sur les opérations et la maintenance	59
4.9.5	Impact sur l’environnement et sur la santé et la sécurité.....	59
5	Synthèse et recommandations	60
5.2	Synthèse de l’analyse.....	60
5.2.1	Points de transfert entre convoyeurs	60
5.2.2	Point de transfert vers empilement.....	62
5.3	Recommandations principales.....	62
5.4	Autres recommandations	64
	CONCLUSION	65

LISTE DE RÉFÉRENCES..... 66

BIBLIOGRAPHIE..... 72

ANNEXE I - FICHE DE DÉCLARATION D'INTÉGRITÉ **Erreur ! Signet non défini.**

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Convoyeur à courroie	5
Figure 1.2	Convoyeur-empileur radial.....	6
Figure 1.3	Exposition aux P ₁₀ en zones urbaines	8
Figure 1.4	Émissions de PT, P _{2,5} et P ₁₀ de 1985 à 2009.....	9
Figure 1.5	Production de particules au Canada et au Québec	10
Figure 4.1	Receveur antifuite	35
Figure 4.2	Étanchement par toiles	36
Figure 4.3	Convoyeur à chaîne	40
Figure 4.4	Convoyeur Liftube sans la courroie et Transpar Ex	44
Figure 4.5	Point d'application typique de jets d'eau.....	51
Figure 4.6	Diffuseur circulaire à eau pour tête de convoyeur-empileur	56
Figure 4.7	Goulottes télescopiques	58
Tableau 1.1	Quantification des émissions de matières particulaires par point de transfert.....	13
Tableau 2.1	Résumé des impacts environnementaux	16
Tableau 3.1	Définition du critère d'efficacité.....	26
Tableau 3.2	Définition du critère de la maturité.....	27
Tableau 3.3	Définition du critère du coût	28
Tableau 3.4	Définition du critère d'impact sur les opérations et la maintenance.....	29
Tableau 3.5	Définition du critère d'impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité	30
Tableau 5.1	Synthèse de l'analyse des options.....	61

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

AEE	Agence européenne pour l'environnement
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
CaCO ₃	Carbonate de calcium
CCHST	Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail
CCME	Conseil canadien des ministres de l'environnement
dB	Décibel
kg	Kilogramme
km ²	kilomètre carré
kWh	kilowatt-heure
LQE	<i>Loi sur la qualité de l'environnement</i>
m ³	mètre cube
Mg	Mégagramme (tonne métrique)
MgCO ₃	Carbonate de magnésium
mm	Milimètre
NA	Non applicable
OMS	Organisation mondiale de la santé
P _{2,5}	Particules de diamètre inférieur ou égal à 2,5 µm
P ₁₀	Particules de diamètre inférieur ou égal à 10 µm
pH	Potentiel hydrogène
PT	Particules totales
RAA	<i>Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère</i>
SPGQA	Système pancanadien de gestion de la qualité de l'air
US EPA	<i>United States Environment Protection Agency</i>
µg	Microgramme

INTRODUCTION

Lorsqu'elles se retrouvent dans l'air, les matières particulaires constituent un polluant, la poussière, pouvant affecter à la fois la santé et l'environnement. Les impacts variés de celles-ci comprennent notamment des problèmes de santé respiratoire et la déstabilisation des équilibres chimiques des écosystèmes (Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 2015a; Sustainable Aggregates, s. d.). Elles représentent également une nuisance lorsqu'elles se déposent près d'activités humaines (Sustainable Aggregates, s. d.). C'est pourquoi les matières particulaires sont maintenant une priorité pour les instances décisionnelles et qu'elles sont assujetties à de nombreuses normes et réglementations à travers le monde, dont l'objectif est d'en restreindre l'émission (Canada. Environnement Canada, 2013a).

Les matières particulaires sont produites par de nombreuses sources, donc l'exploitation du minerai et sa transformation. Cet essai s'intéresse à l'émission de matières particulaires par la manutention de pierre calcaire. Le cas spécifique à l'étude est celui de l'usine de chaux et de pierre de construction de l'entreprise Graymont, située à Marbleton, au Québec. L'entreprise souhaite entreprendre un projet pilote pour optimiser son contrôle sur les matières particulaires dans le secteur du tamisage et du concassage de l'usine. Ce secteur comprend de multiples points de transfert de pierre entre convoyeurs qui peuvent émettre des matières particulaires.

L'objectif ultime de cet essai est de recommander une solution technologique à implanter comme projet pilote de contrôle de matières particulaires à l'usine de Marbleton. Dans cette optique, les trois objectifs secondaires suivants doivent être atteints. Le premier est d'identifier, à l'aide d'une recherche bibliographique, les différentes technologies de contrôle de matières particulaires disponibles. Le second est d'analyser les options technologiques en fonction de critères, qui correspondent aux contraintes du cas de Graymont. Puis, le dernier objectif secondaire est de sélectionner une technologie optimale à implanter comme projet pilote à l'usine.

La recherche initiale a été réalisée en consultant divers guides gouvernementaux, des fournisseurs de technologies de contrôle de la poussière ainsi que des ouvrages scientifiques et d'ingénierie dédiés aux sujets de la manutention et de la pollution de l'air. Les critères d'analyses des technologies ont été identifiés en consultant les ressources internes de l'usine de Marbleton, tant au niveau technique qu'à ceux de l'environnement et de la direction. Les critères retenus sont l'efficacité, la maturité, le coût actualisé, l'impact sur les opérations et la maintenance et les impacts sur l'environnement et sur la santé

et la sécurité. Chacune des technologies potentielles a été évaluée selon ces critères, permettant de sélectionner une solution optimale.

Pour assurer la qualité de l'information, chacune des sources utilisées a été évaluée. C'est d'abord la réputation de l'hôte du document qui a été vérifiée (maison d'édition ou éditeur). La soumission de la publication à des pairs ou à un comité de révision a également été considérée. Ensuite, la réputation de l'auteur a été évaluée en termes d'expertise (bibliographie, nombre de publications et nombre de citations). La qualité du contenu a finalement été évaluée en vérifiant la date de publication, les possibles sources ou indices de biais et la bibliographie. Le domaine des matières particulières n'est pas récent, donc il semble raisonnable de considérer des sources datant de 1970 à aujourd'hui. (Service des bibliothèques de l'Université du Québec à Montréal, 2010)

Cet essai comprend 5 chapitres. Le premier chapitre traite de la problématique générale, en commençant par le mandat. Puis, la terminologie et le cadre législatif des matières particulières de même que les sources d'émission sont abordés. Le cas spécifique de la manutention de la pierre est ensuite expliqué. Les impacts environnementaux, sociaux et économiques des matières particulières sont décrits au chapitre deux. Le chapitre trois explique les technologies envisagées et celles qui sont analysées en profondeur et explique la méthodologie d'analyse utilisée. Le chapitre quatre présente l'analyse de chacune des options et le choix de la solution optimale. Le dernier chapitre conclut l'essai avec des recommandations.

1 PROBLÉMATIQUE

Ce chapitre a pour objectif de décrire la problématique générale des matières particulaires, de laquelle découle le mandat spécifique de cet essai. Celui-ci est d'abord expliqué, suivi des concepts clés et de la classification utilisés dans le domaine des matières particulaires et de la manutention. Le cadre législatif québécois sur les matières particulaires est ensuite discuté. Puis la production de matières particulaires au Canada et dans le monde est abordée pour ensuite se concentrer sur l'exploitation et la transformation du minerai et la production de chaux. Finalement, les modes de production des matières particulaires par la manutention de la pierre sont expliqués.

1.1 Description du lieu d'étude et mandat

Comme mentionné précédemment, le présent essai est le résultat d'un mandat octroyé par l'entreprise Graymont. À son site de Marbleton, Graymont exploite à la fois des carrières de pierre calcaire, qui constitue la matière première principale pour le procédé de fabrication de chaux, ainsi qu'une usine de chaux et de pierre de construction. La pierre est donc extraite des carrières, puis acheminée par camion à l'usine. La pierre subit plusieurs transformations, constituées majoritairement de concassage et de tamisage. Puis les différents types de pierre sont entreposés en piles en fonction de leur granulométrie, de leur composition chimique et de leur utilité finale soit la chaux ou la pierre de construction. Tout au long de ce circuit, la pierre est transportée majoritairement par des convoyeurs à courroie (voir section 1.2 pour plus de détails).

Le secteur visé est celui du concassage et du tamisage et plus spécifiquement, le réseau de convoyeurs entre les différents équipements et parties de l'usine. Ce secteur comprend notamment plusieurs points de transfert qui peuvent être une source d'émissions de particules dans l'atmosphère. Graymont emploie déjà plusieurs méthodes de contrôle de la poussière à ces points. Mais l'entreprise souhaite maîtriser complètement ses émissions de poussière, jusqu'à un objectif ultime s'approchant le plus possible de zéro émission. Le mandat attribué pour cet essai consiste donc à trouver une solution optimale pour répondre à cet objectif.

Il s'agit donc de faire une étude des technologies applicables en fonction des contraintes de l'entreprise et du site de l'usine. Les contraintes sont détaillées dans la section 3.1. C'est de celles-ci que découlent les critères qui ont été sélectionnés pour l'analyse comparative des solutions potentielles.

En vue de faciliter la compréhension de la démarche de ce mandat, la suite de ce chapitre s'attarde sur la problématique générale des matières particulaires. Le chapitre suivant décrit les impacts pouvant en découler et justifie la prise d'action pour le contrôle de la poussière.

1.2 Terminologie et concepts clés

Pour bien appréhender le sujet de cet essai, la classification des matières particulaires ainsi que le concept du transport par convoyeur sont expliqués.

1.2.1 Classification des matières particulaires

Les matières particulaires peuvent être formées de deux classes de particules en fonction de leurs mécanismes de production : les particules primaires ou secondaires. Les particules primaires sont émises directement sous forme de particules. C'est le cas des particules provenant de la manutention de la pierre. Les particules secondaires sont formées dans l'atmosphère à la suite de réactions chimiques ou physiques et comprennent les particules de nitrate, de sulfate et d'ammoniac. Les particules peuvent être autant sous forme solide que liquide. (Canada. Environnement Canada, 2013a)

En fonction de leur taille, les particules peuvent avoir des impacts très différents, en particulier sur la santé. C'est pourquoi Environnement Canada les regroupent en trois classes. Les particules totales (PT) comprennent l'ensemble des particules dont le diamètre est inférieur à environ 100 μm . Les P_{10} correspondent aux particules dont le diamètre est inférieur ou égal à 10 μm . Puis les $P_{2,5}$ ont un diamètre plus petit ou égal à 2,5 μm . Il faut comprendre que les P_{10} incluent les $P_{2,5}$ et que les PT incluent les P_{10} et les $P_{2,5}$. (Canada. Environnement Canada, 2013a) Le *United States Environment Protection Agency* (US EPA) utilise un classement très similaire (United States. US EPA, 2013).

Dans le cadre de cet essai, les termes matières particulaires, particules et poussières sont considérés comme ayant la même signification et sont choisis en fonction du contexte. Lorsqu'une classe plus particulière est abordée, celle-ci est spécifiée.

1.2.2 Convoyeurs à courroie

Cet essai se concentre sur les particules émises par la manutention de la pierre. Dans le cas présent, la manutention de la pierre se fait par convoyeurs à courroie. Ces convoyeurs sont très communs dans l'industrie de la chaux. Comme le démontre la figure 1.1, le transport de la pierre s'effectue sur une

courroie flexible soutenue et propulsée par des rouleaux. La courroie avance donc du point de chargement, qu'on appelle la queue du convoyeur, jusqu'au point de déchargement, la tête du convoyeur, puis fait demi-tour et revient à son point de départ. La pierre arrive et repart du convoyeur par un point de transfert, souvent équipé d'une chute de transfert, qui guide la chute de la pierre.

Lorsqu'une certaine quantité de pierre est accumulée pour un usage ultérieur, elle est stockée sous forme d'empilement à l'aide de convoyeurs-empileurs radiaux, dont un exemple est illustré à la figure 1.2. Ceux-ci fonctionnent de la même manière qu'un convoyeur à courroie normal. Par contre, ils sont mobiles, au sens où leur tête peut effectuer une rotation autour de leur queue, de façon à empiler la pierre sur une surface plus grande. Certains ont également une hauteur ajustable.

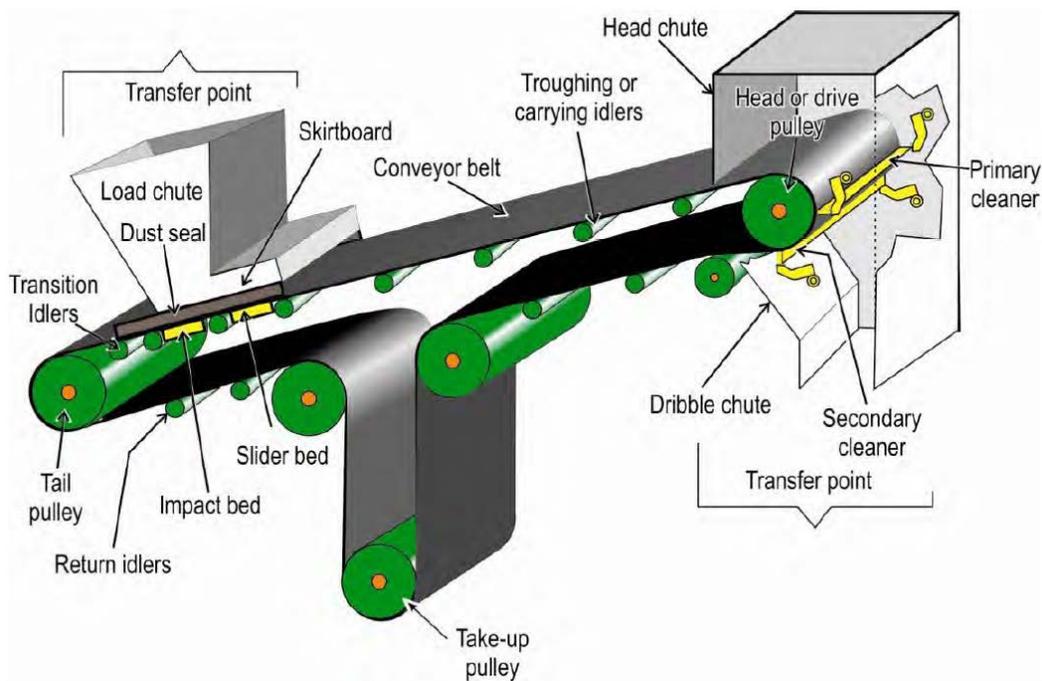


Figure 1.1 Convoyeur à courroie (tiré de : Department of Health and Human Services, 2012, p. 133)

1.3 Cadre législatif

Le principal texte de législation québécoise régissant les particules est le *Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (RAA)*, découlant de la *Loi sur la qualité de l'environnement (LQE)*. Le chapitre II du règlement porte spécifiquement sur les émissions de particules. Les deux premières sections déterminent les limites d'émissions pour les installations et les procédés industriels. La troisième section s'attaque



Figure 1.2 Convoyeur-empileur radial (Tiré de : Graystone inc., 2015)

quant à elle aux émissions diffuses, dont celle provenant de la manutention de matières. L'article 12 restreint donc l'émission diffuse de particules à un rayon de deux mètres de la source d'émission. (*Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère*) Il s'agit donc d'un critère visuel, unique pour tous les types de sources d'émissions.

Dans le cas d'un non-respect de cette limite, l'article 202.7 du RAA prévoit des sanctions administratives. Pour une personne physique, une sanction allant jusqu'à 2000 \$ peut être imposée. Pour tout autre type de personne, la sanction peut monter jusqu'à 10 000 \$. (*Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère*)

De plus, la LQE prévoit maintenant l'obligation pour de nombreuses installations industrielles, dont celles de production de chaux, de respecter des attestations d'assainissement délivrées par le ministre et propre à chaque établissement. Dans le cadre de celles-ci, l'article 31.14 autorise le ministre responsable de la loi, à établir de nouvelles normes spécifiques à une ou des installations pour assurer la préservation de l'environnement. Cela signifie que de nouvelles obligations pourraient voir le jour et être spécifiques à chaque installation. (*Loi sur la qualité de l'environnement*)

Du côté fédéral, Environnement Canada a établi des normes de concentration maximale de particules dans l'air. Elles sont de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2015 et de $8,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2020. (Canada. Environnement Canada, 2013b)

Ces normes ont été produites par le Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME) dans le cadre du système pancanadien de gestion de la qualité de l'air (SGQA). Le Québec ne participe que partiellement à ce système, puisqu'il entraînerait un dédoublement des exigences sur les émissions industrielles avec le RAA. Le système propose une gestion territoriale par zones et bassins atmosphériques de la qualité de l'air. Bien qu'il n'en découle pas de règlement, des initiatives et des plans d'action seront mis en œuvre dans le but de respecter les normes de qualité de l'air. (CCME, 2014)

Le gouvernement fédéral a également récemment mis sur pied le projet de *règlement multisectoriel sur les émissions atmosphériques*. Ce règlement obligerait les installations industrielles visées à respecter des normes d'émissions canadiennes spécifiques à chaque type d'industrie. Pour le moment, le projet de règlement ne vise ni l'industrie de l'extraction du minerai ni celle de la production de chaux. Les seuls polluants ciblés sont d'ailleurs les oxydes d'azote (NOx) et le dioxyde de soufre (SO2). Néanmoins, celui-ci ouvre la voie à une réglementation plus large couvrant de nouveaux secteurs industriels et d'autres polluants, comme les matières particulaires, dans les années à venir. (Canada. Environnement Canada, 2014)

Au Québec, il y a également le *Code civil* qui peut s'appliquer aux nuisances qui créent des troubles du voisinage. L'article 976 du Code civil spécifie en effet que les voisins n'ont pas à tolérer les inconvénients anormaux du voisinage s'ils excèdent les limites de la tolérance. (*Code civil du Québec*) C'est en s'appuyant sur cet article que la Cour suprême du Canada a fait précédent avec son jugement *Ciment du Saint-Laurent inc. c. Barrette*. Celui-ci concerne un recours collectif du voisinage d'un producteur de ciment pour des nuisances, comprenant entre autres l'émission de poussière. L'issue du jugement est la reconnaissance d'un régime de responsabilité sans fautes pour les troubles de voisinage. Cela signifie que, même si aucune faute n'est commise, que les obligations légales sont respectées et qu'il n'y a aucune intention de nuire, une personne peut être responsable civilement des inconvénients qu'elle cause s'ils sont jugés excessifs ou anormaux. (*Ciment du Saint-Laurent inc. c. Barrette*, 2008) Cela a entraîné la responsabilité à Ciment du Saint-Laurent de dédommager les victimes de ses nuisances. Il est donc possible, malgré le respect de toutes les exigences légales, qu'une entreprise soit jugée responsable de dédommager ses voisins si ses émissions de matières particulaires provoquent des inconvénients anormaux.

1.4 La pollution par les particules

La pollution atmosphérique par les particules est répandue partout dans le monde à divers degrés. De plus, les sources de production sont variées et comprennent plusieurs secteurs d'activité. Cette section a

pour objectif de présenter un portrait mondial et canadien sommaire de la pollution particulaire. De plus, les principales sources et secteurs d'activités responsables sont discutés.

1.4.1 Portrait mondial

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) présente sur son site web une carte interactive sur l'exposition aux P_{10} dans le monde. Cette étude présente donc les teneurs annuelles moyennes en P_{10} en milieu urbain. Les moyennes ont été obtenues en utilisant les données existantes et disponibles seulement, il n'y a donc pas eu d'échantillonnage exhaustif. Il manque notamment les données pour pratiquement l'ensemble de l'Afrique, les États-Unis et l'Australie. Néanmoins, ces données permettent d'avoir une vue d'ensemble sur la pollution atmosphérique par les particules et de comparer la majorité des pays entre eux. (OMS, 2014) Les résultats sont présentés en microgramme par mètre cube ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la figure 1.3.

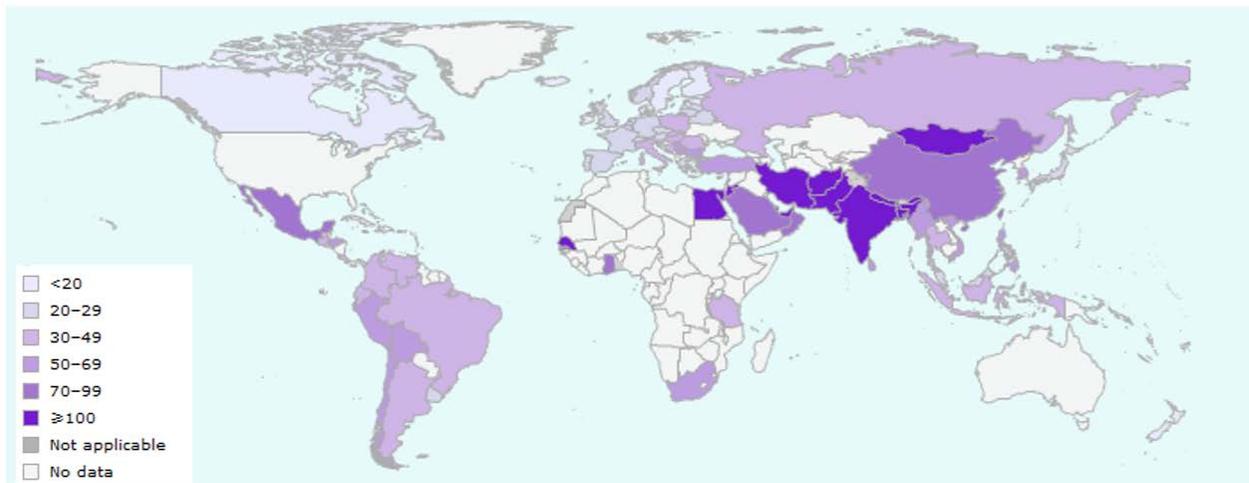


Figure 1.3 Exposition aux P_{10} en zones urbaines (Tiré de : OMS, 2014)

Les concentrations des pays varient entre 9 et $282 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui signifie que plusieurs pays dépassent la valeur maximale recommandée par l'OMS soit $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de P_{10} . Le pays avec la plus faible concentration est l'Islande, alors que le pays avec la plus forte est le Pakistan. La région ayant les plus fortes concentrations est le sud du Moyen-Orient. L'Inde, la Mongolie et l'Égypte font également partie de ce lot avec des moyennes supérieures à $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Du côté de l'Amérique, le Mexique est le pays avec le plus de pollution particulaire, avec une concentration de $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tandis que le Canada a la plus faible concentration, soit $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. (OMS, 2014)

D'un point de vue mondial, le Canada s'en tire très bien. Cela s'explique possiblement par la très faible densité de population et d'occupation du territoire de même que par l'existence de législation environnementale et de normes de santé et sécurité.

1.4.2 Portrait du Canada

Statistique Canada recueille chaque année les rapports d'émissions des installations qui sont assujetties à l'Inventaire national des rejets de polluants. Ces données permettent de visualiser l'évolution temporelle des émissions des particules, comme le montre la figure 1.4. Cette figure permet de constater que la quantité de PT émise a augmenté de plus de 30 % alors que les émissions de P_{2,5} et de P₁₀ sont restées plutôt stables depuis 1985. (Statistiques Canada, 2013) Cela n'est pas surprenant puisque plus les particules sont fines, plus les impacts sur la santé peuvent être importants (voir chapitre 3). Les mesures de réduction ou de contrôle des émissions, notamment sur les milieux de travail, ont davantage à se concentrer sur les plus petites particules.

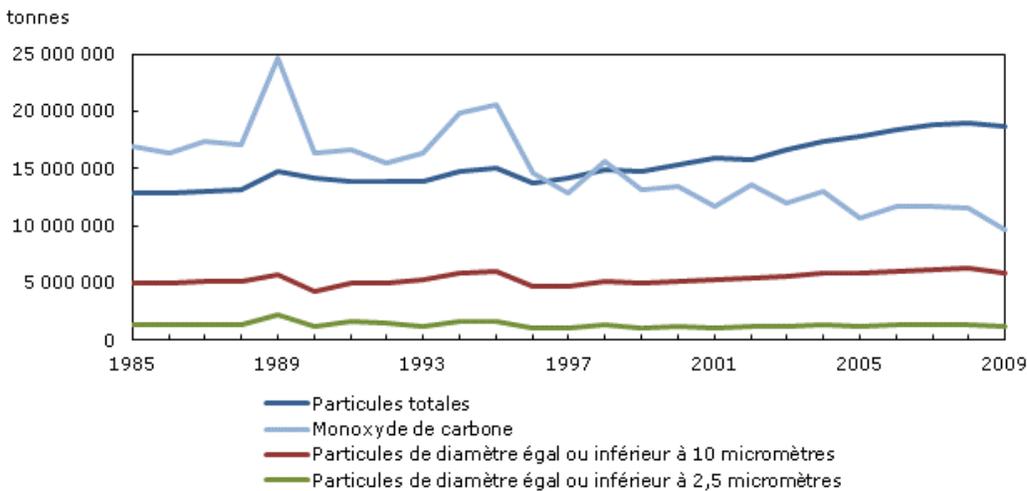


Figure 1.4 Émissions de PT, P_{2,5} et P₁₀ de 1985 à 2009 (Tiré de : Statistiques Canada, 2013)

Pour ce qui est des sources d'émissions de particules, celles-ci sont regroupées par secteurs d'activité. Les principaux secteurs sont présentés à la figure 1.5 pour le Canada et le Québec et pour les trois classes de particules.

On remarque à la figure 1.5, que les sources principales d'émissions de particules, tant au Canada qu'au Québec, sont la circulation sur les routes et la construction. L'agriculture a une part plus importante pour

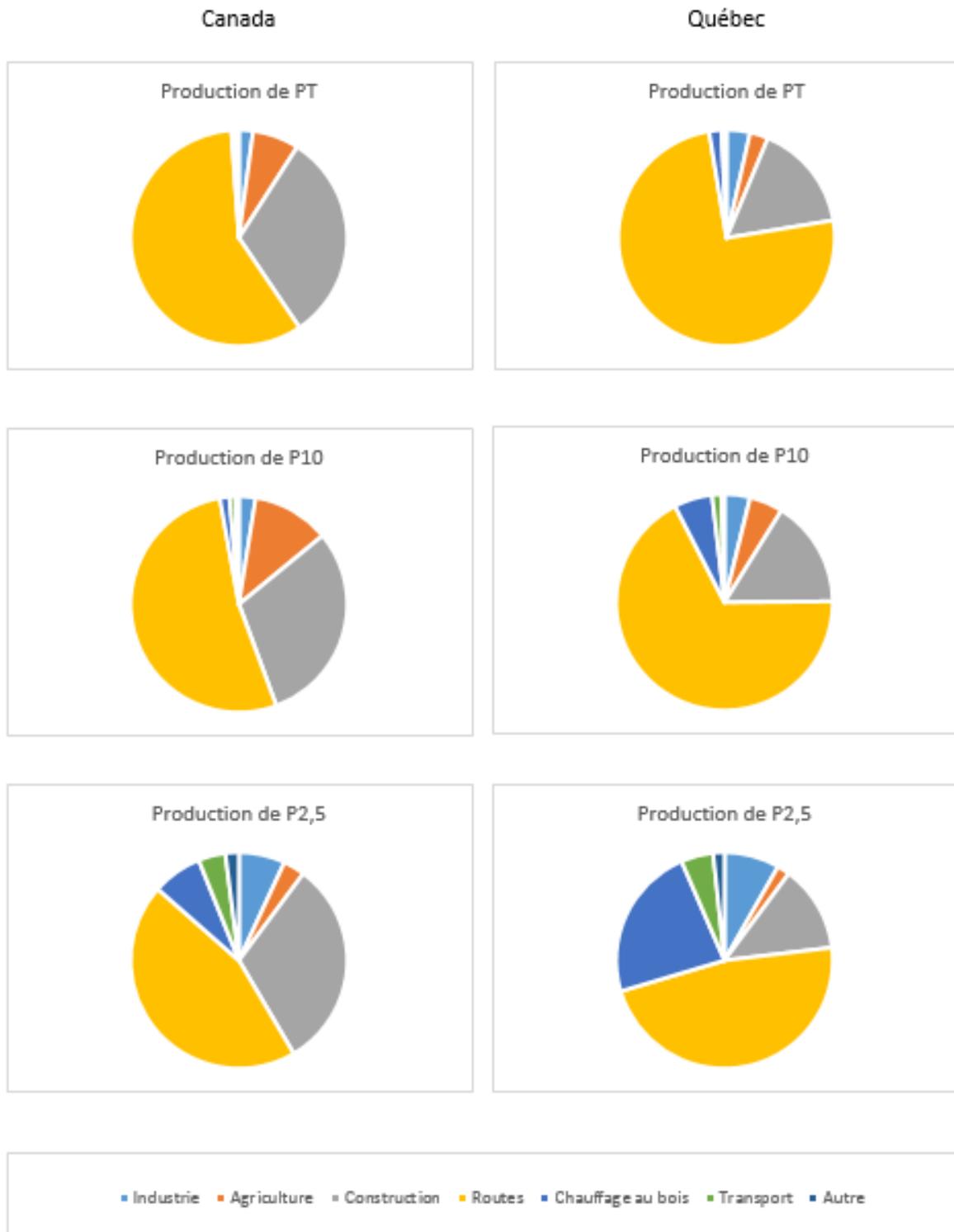


Figure 1.5 Production de particules au Canada et au Québec (Statistiques Canada, 2014)

ce qui est des P_{10} . Le chauffage résidentiel au bois est quant à lui responsable d'une fraction importante des émissions de $P_{2,5}$ québécoises, alors qu'il l'est beaucoup moins au Canada et pour les P_{10} et les PT.

L'industrie est également une source non négligeable de particules. De la même façon que le transport, plus la taille des particules est petite, plus l'industrie est responsable d'une grande proportion des émissions. Dans le cas des $P_{2,5}$ au Québec, c'est une proportion de 8 % qui est attribuable à l'industrie.

La manutention de la pierre pour la production de chaux entre dans deux des secteurs d'activité industriels utilisés par Statistique Canada, soit la production de chaux et l'opération de mines et carrières (catégorie roche, sable et gravier). La production de chaux n'étant pas une activité très répandue au Québec, elle produit moins de 0,5 % des émissions des PT de sources industrielles du Canada et du Québec. Son apport le plus important est au niveau des P_{10} , soit plus de 0,7 % au Québec. Cette étude statistique ne permet cependant pas de différencier les particules provenant du procédé de fabrication de la chaux, soit la calcination, de celle provenant de la manutention de la pierre et de la chaux. L'exploitation de carrières occupe quant à elle une place importante parmi les producteurs industriels de particules puisqu'elle produit environ 30 % des PT et des $P_{2,5}$ et 10 % des P_{10} du total des sources industrielles au Québec. (Statistique Canada, 2014)

1.5 La production de matière particulaire par la manutention de la pierre

Cette section s'intéresse à la production de matières particulaires par la manutention de pierre par convoyeurs à courroie et spécifiquement aux points de transfert. Les mécanismes physiques engendrant les particules sont d'abord expliqués. Puis la poussière générée est quantifiée et sa granulométrie décrite.

1.5.1 Les mécanismes de production

La production de particules lors de la manutention de matière solide en vrac est inévitable. Cependant, il existe plusieurs moyens de la contrôler. Il existe trois principaux mécanismes de production de poussière : la chute libre, l'élévation forcée et le frottement. (Levy et Kalman, 2001) Dans tous les cas, la poussière est produite lorsqu'une force extérieure intervient et permet aux particules présentes parmi les solides plus gros de se détacher ou d'être libérées. Ces particules se retrouvent donc dans l'air et forment un nuage de poussière.

Dans le cas de la manutention de la pierre, c'est la chute libre qui est le principal générateur de poussière. La chute libre se produit lorsque le matériel est transféré d'un convoyeur à un autre. La tête d'un

convoyeur se situe à une hauteur variant entre quelques centimètres et quelques mètres au-dessus de la queue d'un autre convoyeur sur lequel il se décharge. Le matériel tombe alors de l'un à l'autre en passant par une chute de transfert (voir figure 1.1). Il y a aussi chute libre lorsque le matériel passe d'un convoyeur-empileur à un empilement. La hauteur est dans ce cas très variable en fonction de la hauteur de la pile et peut atteindre plusieurs mètres. Certains empileurs ont une hauteur ajustable et suivent la pile au fur et à mesure de sa création, ce qui limite la quantité de particules libérées (voir figure 1.2).

L'élévation forcée se produit surtout dans les systèmes de transport pneumatique ou par vis. Ce type de génération ne se produit donc pas dans la présente application (Levy et Kalman, 2001).

Finalement, le frottement se produit de plusieurs façons. D'abord, le matériel transporté peut être en contact avec des surfaces, comme la courroie des convoyeurs, les capots métalliques recouvrant les convoyeurs, les parois des chutes, etc. Il peut aussi y avoir du frottement avec l'air environnant, soit à cause du vent ou à cause du déplacement de matériel qui frotte sur l'air stagnant. De plus, il peut y avoir de la friction entre les morceaux de pierre eux-mêmes lorsque le matériel est en mouvement, ou s'il y a de la vibration. Cette friction permet donc aux particules contenues dans le matériel de se séparer de celui-ci et de se retrouver dans l'air.

Deux autres équipements générateurs de poussières sont impliqués dans la manutention de la pierre par convoyeur : les rouleaux de retour de la courroie et les racloirs à courroie. Comme le matériau transporté comprend des particules et des morceaux de petite taille, certains d'entre eux restent collés à la surface de la courroie lorsqu'elle fait demi-tour à la tête du convoyeur. (United States. Department of Health and Human Services, 2012) Ce phénomène est amplifié lorsque la courroie est usée et présente des irrégularités de surface (Houde, 2014). La courroie passe ensuite à l'envers sur les rouleaux de soutien qui peuvent dégager la matière collée par frottement et produire un nuage de poussière. Pour éviter ce problème, la tête des convoyeurs est souvent équipée de racloirs qui servent à retirer le matériel fin qui reste collé sur la courroie. L'objectif est que l'ensemble de cette matière soit retiré au point de transfert, plutôt que tout au long du retour de la courroie, ce qui diminue l'étendue du nuage de poussière créé. Des racloirs typiques sont illustrés à la figure 1.1. Par contre, les racloirs ne sont pas efficaces à 100 %. Il reste toujours un peu de matériel fin sur la courroie, surtout lorsque la courroie est usée et que les racloirs n'ont plus un bon contact sur toute la surface de celle-ci. Il peut donc y avoir production de particules fugitives aux racloirs et aux rouleaux de retour. (United States. Department of Health and Human Services, 2012)

En somme, la poussière est produite majoritairement aux points de transfert entre les convoyeurs ou sur les piles. La majorité de la poussière émise à cause de la friction des rouleaux de retour est aussi produite

près de la tête des convoyeurs. Ce sont donc les extrémités qu'il faut privilégier comme lieu de contrôle de la poussière.

Un facteur à ne pas négliger est que comme les particules sont en suspension dans l'air, elles suivent son mouvement. L'air, comme tous les fluides, a tendance à suivre le chemin qui lui cause le moins de restriction (Munson et autres, 2009). Donc la poussière peut sortir du système à un endroit éloigné de la source de poussière, si le chemin le plus facile l'y entraîne. C'est ce que l'on observe aux points de transfert dont la hauteur est élevée. Même si la majorité de la poussière est produite au point de contact du matériel sur la queue du convoyeur au bas de la chute, la poussière peut remonter jusqu'en haut si elle peut s'échapper plus facilement dans cette direction que dans une autre.

1.5.2 La matière particulaire générée

Comme la quantité totale de matière particulaire émise par un point précis n'est pas facilement mesurable, l'US EPA a pris l'initiative de fournir des données standards d'émissions pour les équipements communs. Parmi ceux-ci figurent les points de transfert entre convoyeurs. Plusieurs paramètres peuvent influencer la quantité d'émissions produite comme l'humidité du matériau transporté, le vent, le type de pierre, sa granulométrie et la température, pour ne nommer que ceux-là. Les conditions de test sélectionnées donnent des résultats qui correspondent à des conditions d'opération typique. (United States. US EPA, 2004)

Les émissions produites par un point de transfert entre convoyeurs sans contrôle de la poussière sont consignées dans le tableau 1.1. Les données comprennent aussi les émissions produites par un point de transfert qui utilise des jets d'eau comme méthode de contrôle. Les unités sont en kilogramme (kg) de matière particulaire par tonne métrique ou mégagramme (Mg) de matériau transféré d'un convoyeur à l'autre.

Tableau 1.1 Quantification des émissions de matières particulaires par point de transfert (United States. US EPA, 2004)

Point de transfert	PT (kg/Mg)	P ₁₀ (kg/Mg)	P _{2,5} (kg/Mg)
Aucun contrôle	0,0015	0,00055	N-D
Contrôlé avec jet d'eau	0,00007	2,3 * 10 ⁻⁵	6,5 * 10 ⁻⁶

Il ressort du tableau 1.1 que pour chaque tonne de pierre concassée qui passe par un point de transfert, c'est 1,5 g de particules totales qui sont émises dans l'atmosphère. À prime à bord, cela peut sembler peu,

mais en général, ce sont des milliers de tonnes de pierres qui sont produites chaque jour dans les installations industrielles. De plus, chaque tonne de pierre peut passer par de multiples points de transfert, ce qui peut donner une ou plusieurs dizaines de grammes de particules par tonne de pierre.

La proportion de particules dont le diamètre est inférieur ou égal à 10 μm est d'environ 37 %. Comme la donnée pour les $\text{P}_{2,5}$ sans contrôle n'est pas disponible, on ne peut pas déduire de pourcentage. Par contre, en observant les données pour les points de transfert contrôlés avec jets d'eau, il s'avère que pour les PT et les P_{10} , le contrôle à l'eau diminue les émissions entre 21 et 24 fois. On peut donc supposer, sans toutefois considérer que ce calcul possède une quelconque rigueur scientifique, que le même ratio s'applique au $\text{P}_{2,5}$. En effet, rien ne prouve que les particules les plus fines réagissent de la même façon que les plus grosses particules à l'eau. Tout de même, en utilisant un ratio de 23, il y aurait possiblement environ 10 % des particules totales dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 μm .

Le fait de connaître la composition granulométrique approximative de la matière particulaire émise permet de déterminer quels sont ses impacts potentiels, puisque ceux-ci dépendent de la taille des particules. Le chapitre 2 traite des impacts potentiels environnementaux, sociaux et économiques des émissions de matières particulaires.

2 IMPACTS

Ce chapitre porte sur les impacts négatifs que cause la poussière de pierre calcaire. La poussière en général est reconnue pour son effet potentiel sur la santé, mais elle impacte également l'environnement et certains aspects de la société. De plus, l'émission de poussière peut avoir un impact économique important. Le but du présent chapitre n'est pas de recenser exhaustivement l'ensemble des impacts, mais bien de connaître les impacts les plus probants qui justifient d'intervenir pour diminuer l'émission de poussière.

2.2 Impacts environnementaux

Un recensement complet des impacts environnementaux a déjà été effectué en 2012 par Maxime Descôteaux dans son essai intitulé : *Diminuer les émissions de poussières d'un site d'extraction et de traitement de pierre calcaire*. C'est pourquoi seulement un résumé de ces impacts est présenté ici.

Les impacts environnementaux des particules dépendent à la fois de leur composition chimique et de leur taille. Dans le cas à l'étude, les particules proviennent de pierre calcaire et sont majoritairement composées de carbonate de calcium (CaCO_3). La pierre calcaire peut aussi contenir du carbonate de magnésium (MgCO_3) et des particules de quartz, de feldspath, de l'argile, de la pyrite et de la sidérite. (King, 2005) La taille des particules varie, mais comme spécifié à la section 1.5, seulement 37 % des particules ont un diamètre inférieur à 10 μm et environ 10 % a un diamètre inférieur à 2,5 μm .

Le tableau 2.1, tiré de l'essai de Maxime Descôteaux regroupe l'ensemble des impacts qu'il a répertorié. Seules les lignes traitant des impacts sur l'humain ont été omises puisque cette thématique est abordée dans la section suivante sur les impacts sociaux.

Le tableau 2.1 montre qu'il n'y a qu'un seul impact élevé, soit le gaspillage de la ressource. En effet, la poussière est constituée de particules de matière première qui ne peut pas être utilisée pour la production puisqu'elles sont perdues dans l'air. Pour compenser cette perte, il faut donc augmenter les opérations d'exploitation des carrières et le transport de la matière première ce qui augmente les impacts reliés à ces activités.

La poussière de pierre calcaire peut également augmenter le potentiel hydrogène (pH) de l'eau et du sol sur lesquels elle se dépose. L'impact dépend du contexte particulier du lieu affecté. En effet, une augmentation du pH de l'eau peut dans certains cas empêcher son utilisation récréative par l'humain. De plus, certaines espèces sont sensibles au niveau de pH de leur habitat, que ce soit l'eau ou le sol, mais il a

Tableau 2.1 : Résumé des impacts environnementaux (Tiré de : Descôteaux, 2012, p. 17)

Composantes 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
Faune	Dommage 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 terme	Moyen
	Augmentation de la productivité des plantes	+	Régional	Léger	Moyen terme	Moyen
Ressources	Gaspillage de la ressource	-	Local	Total	Long terme	Élevé

été évalué qu'une augmentation du pH par la poussière de calcaire ne compromettrait pas la vie aquatique. Par contre, en raison des pluies acides, une grande superficie de sols et certains plans d'eau sont aux prises avec un pH trop bas. La déposition de poussière de calcaire dans ces lieux pourrait permettre de remonter le pH et de contrer l'effet négatif des pluies acides.

Les autres impacts négatifs répertoriés concernent la faune et la flore. La poussière peut affecter le système respiratoire, notamment les branchies de la faune aquatique sur laquelle la matière en suspension causée par la poussière a le même effet que la poussière contenue dans l'air sur des poumons exposés. Pour ce qui est de la flore, lorsque la poussière est déposée en assez grande quantité pour affecter l'exposition des plantes à la lumière du soleil, le processus de photosynthèse peut devenir moins performant, ce qui diminue la productivité des plantes. Cela ne s'observe que très près des sources d'émission. Pour la flore située plus loin, c'est par l'intermédiaire des caractéristiques du sol et de l'eau affectées par la poussière que les plantes peuvent subir des impacts autant négatifs que positifs en fonction de leur milieu.

En somme, les impacts environnementaux causés par la poussière sont peu élevés et sont surtout perceptibles à un niveau local ou régional. En fonction du milieu d'émission, la poussière peut néanmoins avoir des impacts notables en raison desquels il est préférable de minimiser les émissions de poussière.

2.3 Impacts sociaux

Les impacts sociaux, c'est-à-dire sur les humains et leur mode de vie, comprennent les effets sur la santé, l'impact sur la sécurité et les nuisances, qui sont traités dans les sections suivantes.

2.3.1 Impacts sur la santé

La poussière impacte la santé humaine principalement par inhalation, lorsqu'elle est en suspension dans l'air. Une fois dans le système respiratoire, la poussière peut avoir divers effets en fonction de son lieu de déposition, qui dépend surtout de la taille des particules et bien sûr, de la quantité inhalée. De manière générale, plus les particules sont petites, plus elles entrent profondément dans les poumons et plus les effets sur la santé sont importants. (Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST), 2015b)

Les particules de plus de 10 μm , qui constituent la plus grande fraction de la poussière générée par la manutention de pierre calcaire, se déposent pour la plupart par impaction dans le nez ou dans la gorge. Comme ces particules ont une masse assez importante, leur inertie est élevée et lorsque l'air change de direction pour suivre les voies respiratoires, celles-ci continuent en ligne droite et frappent les parois du système. (CCHST, 2015b)

Dans le nez, l'un des effets les plus fréquents est la rhinite. Celle-ci se reconnaît par un nez bouché, des sécrétions nasales importantes et une diminution de l'odorat (Institut français de chirurgie du nez et des sinus, 2015). La poussière peut aussi causer une inflammation des muqueuses nasales et de la trachée (trachéite). L'irritation des yeux peut également être un symptôme de l'exposition à la poussière. (CCHST, 2015a)

Les particules ayant un diamètre entre 0,5 μm et 10 μm se déposent par deux mécanismes. Il y a d'abord l'impaction, discutée plus haut, mais cette fois-ci, les particules se déposent dans les bronches principales. Le second mécanisme est la sédimentation. Les effets cumulés de la gravité et de la résistance de l'air imposent aux particules de se déposer, particulièrement dans les bronches et bronchioles. L'inflammation des muqueuses de ces tissus peut provoquer la bronchite. (CCHST, 2015a; CCHST, 2015b)

Les particules de moins de 0,5 µm se déposent surtout grâce à la diffusion, le mouvement aléatoire des particules. La déposition se fait donc au hasard tout au long du système respiratoire et particulièrement dans les alvéoles. Les alvéoles sont munies d'un système de défense contre ce type de corps étranger, soit les macrophages. Lorsque la poussière est inhalée en plus grande quantité que la capacité d'élimination des macrophages, il peut alors se créer des lésions pulmonaires. (CCHST, 2015a; CCHST, 2015b)

Le type de lésion le plus connu est la cicatrisation des tissus pulmonaires causée par les particules fibreuses, tel l'amiante. Or, la poussière de pierre calcaire ne comprend pas de particules fibreuses. Il y a donc généralement peu ou aucune lésion pulmonaire. (CCHST, 2015a)

2.3.2 Impact sur la sécurité

Un impact bien connu des nuages de poussière est leur effet négatif sur la visibilité, qui peut entraîner des problèmes de sécurité. Au même titre que des précipitations abondantes de neige ou de pluie ou la présence de brouillard, les nuages de poussière diminuent la visibilité en augmentant la turbidité de l'air. (Sittig, 1977)

Comparativement à l'effet sur la visibilité de la fumée ou des véhicules motorisés, l'effet de la poussière est moins significatif. C'est surtout très près de la source d'émission que la visibilité peut être vraiment affectée. (New Zealand. Ministry for the Environment, 2008) Dans le cas des nuages de poussière provenant de la manutention de la pierre, à moins qu'il n'y ait des vents importants, les effets sur la visibilité sont ressentis seulement à quelques mètres de la zone d'émission.

La sécurité devient un enjeu lorsqu'il y a une route très près du point d'émission. En effet, la visibilité amoindrie par la poussière constitue un facteur augmentant le risque d'accident. C'est aussi le cas pour les véhicules industriels qui circulent directement sur le site de production. Par exemple, certains chargeurs doivent ramasser du matériel en piles sous des empileurs. S'il n'y a pas d'équipement de contrôle de la poussière, la chute de matériel sur l'empilement peut créer un nuage de poussière. Celui-ci est encore plus opaque si l'empilement est confiné, dans un abri ou un entrepôt notamment. Il arrive que les chargeurs doivent aller chercher du matériel en même temps que l'empileur est en fonction. Dans ce cas, la visibilité du chauffeur peut être grandement affectée. Les manœuvres sont alors plus risquées et la sécurité des gens de même que l'intégrité des équipements ou bâtiments aux alentours sont plus à risque. (Ouelet, 2015)

2.3.3 Nuisances

Les nuisances industrielles correspondent à « un ensemble de facteurs d'origine technique ou sociale qui nuisent à la qualité de vie » (Robert, 2008). Elles ont donc effet négatif sur la capacité de l'humain à jouir de son milieu ou de ses biens. Dans le cas de la poussière, ce sont les communautés avoisinantes, chez qui la poussière se dépose, qui subissent les nuisances.

Une nuisance importante est l'effet inesthétique que la poussière provoque sur les surfaces où elle se dépose. Le ministère de l'Environnement de la Nouvelle-Zélande liste plusieurs surfaces pour lesquelles des plaintes sont reçues : les voitures, les fenêtres et cadres de fenêtres, les vêtements étendus à l'extérieur, les fleurs et les fruits et légumes dans les potagers. La poussière qui se dépose à l'intérieur des maisons est également un irritant majeur. L'aspect visuel dérangeant et l'obligation de corvées de nettoyage plus fréquentes sont donc les nuisances occasionnées. Cela peut de plus avoir un impact économique, qui est traité dans la section suivante. On note aussi un effet sur la possibilité de jouir de son terrain pour des activités extérieures. (New Zealand. Ministry for the Environment, 2008)

Ces nuisances constituent des irritants pour les communautés dans lesquelles s'insèrent les industries émettrices de poussière. L'acceptabilité sociale des opérations peut donc être amoindrie et nuire à la réputation de l'exploitant.

2.4 Impacts économiques

Les impacts environnementaux et sociaux se transposent souvent en impacts économiques puisqu'ils entraînent un coût. C'est le cas de l'impact sur la santé et des nuisances qui sont traités dans la section suivante. Certains impacts entièrement économiques sont ensuite discutés.

2.4.1 Coûts liés aux soins de santé

Pour estimer les coûts engendrés par les soins de santé rendus nécessaires à cause de la poussière présente dans l'air, l'approche utilisée par l'Agence Européenne pour l'environnement (AEE) dans son rapport *Costs of air pollution from European industrial facilities 2008–2012* est utilisée. (European Union. AEE, 2014)

L'AEE a utilisé l'approche par chemin d'impact (traduction libre de *Impact Pathway approach*) qui consiste à combiner les données d'émissions des installations industrielles avec la modélisation de dispersion des polluants. L'analyse inclut également l'exposition de la population aux émissions et calcule l'impact

marginal de celles-ci sur la santé puis transpose cet impact sous forme de coût financier. Le résultat appelé dommage est le coût en euros engendré par tonne d'émission. Le dommage est donc spécifique pour chaque polluant et pour chaque pays puisque les pays européens ont diverses densités de population et d'activités industrielles.

L'impact total des matières particulaires (P_{10} et $P_{2,5}$) a été évalué en tenant compte de certains impacts seulement : l'effet chronique sur la mortalité et la morbidité des bronchites et les effets aigus sur le nombre de visites hospitalières pour difficulté respiratoire et cardiaque, les consultations des pharmaciens, la perte de jours d'activité, l'utilisation de médicaments traitant les problèmes respiratoires et le nombre de jours de symptômes.

Comme l'analyse n'a pas été effectuée pour le Québec, la Suède a été choisie comme étant le pays plus représentatif du Québec parmi les pays analysés. Le sud du Québec a une densité de population d'environ 21,5 habitants par kilomètre carré (km^2) (les régions du Nord-du-Québec et de la Côte-Nord ont été exclues du calcul de densité) (Institut de la statistique du Québec, 2014), ce qui est similaire à la Suède avec 21,8 habitants par km^2 (European Union. AEE, s. d.). De plus, les deux pays sont industrialisés, ont des climats semblables et sont situés à proximité des côtes. C'est donc le pays qui a le plus de similitudes avec le Québec pour ce qui est des facteurs influençant l'analyse. Il faut toutefois garder en tête que les deux pays sont différents sur plusieurs points qui peuvent avoir un effet important sur le résultat. L'objectif ici est d'obtenir un ordre de grandeur du coût engendré par la poussière et non pas un calcul précis.

Le dommage calculé pour la Suède est entre 7644 et 23 204 euros/tonne de P_{10} et entre 4964 et 15 067 euros/tonne de $P_{2,5}$. À noter qu'il a été supposé que les impacts sur la santé sont les mêmes pour les deux types de particules. Si l'on utilise la médiane des intervalles calculés et la poussière moyenne générée par un point de transfert à 200 tonnes par heure, on obtient une estimation du coût engendré. Un seul point de transfert non contrôlé aurait donc un impact financier moyen estimé à environ 9900 \$ par an, seulement en frais de soins de santé.

2.4.2 Nuisances

Le coût de certaines nuisances peut aussi être évalué. L'exercice a été effectué en 1973 pour le coût engendré par l'augmentation de la fréquence et de l'intensité du nettoyage nécessaire en raison d'un dépôt important de poussière sur des propriétés domiciliaires privées. L'article est plutôt vieux et le sujet mériterait donc d'être étudié à nouveau dans le contexte actuel. Le résultat est tout de même intéressant. Ramenés en valeur d'aujourd'hui, la poussière augmenterait les coûts d'entretien annuels de 500 à 1000 \$,

ce qui représente un montant élevé pour un grand nombre de foyers. La quantité d'émissions de même que la distance du terrain par rapport à la source peuvent toutefois faire varier grandement cette valeur. (Narayanan et Lancaster, 1973)

Une autre nuisance tout aussi importante et ayant un impact économique est la diminution de la valeur des propriétés en raison de la poussière. Il s'agit d'un impact d'envergure lorsque la production de poussière a commencé après l'achat de la propriété et que la vente a lieu après. Ce coût varie beaucoup en fonction du contexte et du type de propriété et doit être évalué au cas par cas. (New Zealand. Ministry for the Environment, 2008)

2.4.3 Autres impacts économiques

Parmi les autres impacts économiques, on note la perte de matière, qui se transpose en perte financière. Comme mentionné au chapitre 1, la poussière générée par un point de transfert non contrôlé correspond à environ 1,5 gramme par tonne de matière convoyée. Cela correspond à 0,00015 % de la matière première qui est perdue. Or la matière passe par plusieurs points de transfert, de même que par différents équipements engendrant de la poussière comme les tamis et les concasseurs. La perte est donc décuplée. La perte financière correspond au coût d'exploitation en carrière et au coût de transport de la pierre jusqu'à l'usine pour compenser la perte occasionnée.

Un autre impact économique est l'usure des équipements soumis à l'émission de poussière (Mody et Jakhete, 1987). D'abord, la poussière peut s'infiltrer dans les équipements électriques et empêcher leur fonctionnement normal. Puis, l'abrasion des particules peut entraîner des dommages aux équipements mécaniques ou aux surfaces exposées. (Campanac et autres, 2000) Une étude effectuée aux Émirats Arabes Unis sur l'effet de la poussière provenant du désert sur les moteurs a montré que l'infiltration de poussière augmente l'usure, augmente l'apport énergétique nécessaire à la propulsion du moteur, entraîne une perte de puissance et peut causer des bris d'équipement (Townsend, 2012).

C'est un effet qui est d'ailleurs facilement observable en usine. Les rouleaux de convoyeurs à courroie fortement exposés à la poussière ont tendance à cesser de fonctionner plus rapidement que les autres. La poussière s'infiltré dans la graisse contenue entre le rouleau et l'arbre, et diminue son action lubrifiante. Au bout d'un certain temps, les rouleaux cessent simplement de tourner puisque le frottement de la courroie à leur surface est moindre que celui de leur rotation. Cela implique évidemment une demande énergétique plus grande pour faire avancer la courroie en plus d'augmenter la friction sur celle-ci, ce qui diminue sa durée de vie.

En somme, la poussière a de nombreux impacts sur l'environnement, la société et l'économie. Même si individuellement ils peuvent sembler minimes, l'ensemble des impacts est important et justifie amplement que des actions soient mises en places pour contrôler les émissions de poussière.

3 MÉTHODOLOGIE

Cette section décrit la méthodologie utilisée pour l'analyse des technologies de contrôle de la poussière. La section 3.1 indique d'abord comment les différentes technologies ont été répertoriées, puis liste les solutions retenues pour l'analyse ainsi que celles qui ont été éliminées. La section 3.2 traite ensuite de la façon dont l'analyse a été effectuée et présente les critères qui ont été utilisés. La section 3.3 décrit finalement comment les solutions ont été comparées entre elles.

3.2 Identification des solutions technologiques potentielles

La première étape effectuée afin de trouver une méthode de contrôle de la poussière a été de répertorier l'ensemble des solutions envisageables. Plusieurs sources d'information ont été utilisées pour obtenir un portrait complet. D'abord, une revue de littérature a permis de trouver plusieurs solutions existantes. Les guides de Mody et Jakhete et du Department of Health and Human Services ont été les principales sources utilisées (Mody et Jekhete, 1987; United States. Department of Health and Human Services, 2012).

Ensuite, une recherche à l'interne, auprès des intervenants dans le domaine de l'environnement, des opérations et des services techniques de Graymont, a permis d'identifier l'ensemble des connaissances que l'entreprise possède déjà, mais qui ne sont pas nécessairement répandues sur l'ensemble des sites. Les trois usines de chaux du Québec, de même que l'usine située à Exshaw en Alberta ont été visitées pour répertorier et évaluer leurs méthodes de contrôle de la poussière et déterminer ce qui est applicable à Marbleton.

Une recherche de fournisseurs sur le web a aussi révélé plusieurs équipements de contrôle intéressants. Des fournisseurs ont aussi été contactés pour connaître plus de détails sur leurs produits et pour obtenir des soumissions.

La présélection des options est basée sur une étude préliminaire de leur faisabilité en fonction des contraintes de l'usine de Marbleton. Les paragraphes suivants décrivent ces contraintes.

- En premier lieu, le gisement de calcaire exploité pour approvisionner l'usine contient de l'argile en plus de la pierre. La pierre concassée et la poussière émise conservent l'humidité de l'argile. La poussière est donc collante et s'agglomère sur les surfaces. Elle ne glisse donc pas facilement et peut provoquer le colmatage de conduits trop étroits.
- La majorité des installations de l'usine se retrouve à l'extérieur. Elles sont donc sujettes aux intempéries, au froid et à l'ensoleillement. Les équipements doivent donc être suffisamment solides

pour résister aux conditions les plus difficiles de l'hiver. Le gel et l'accumulation de neige ou de glace ne doivent pas nuire à leur fonctionnement.

- La solution ne doit pas nuire à la production. Elle doit également permettre de poursuivre l'opération et la maintenance des équipements existants. Puis, elle ne doit pas monopoliser les employés, c'est-à-dire qu'elle doit fonctionner autant que possible par elle-même et demander un entretien minimum puisque les ressources humaines sont limitées et déjà bien occupées.
- Beaucoup de convoyeurs sont placés sur des structures et situés à plusieurs mètres du sol. Le poids d'équipement supplémentaire pour le contrôle de la poussière peut être contraignant, car les structures ont été conçues pour soutenir le poids des équipements actuels seulement. Bien sûr, il y a une certaine marge de manœuvre, mais les équipements très lourds sont à éviter, particulièrement sur les convoyeurs-empileurs.
- L'usine est située très près d'un village. Une route publique passe aussi au milieu des installations. Les équipements de contrôle de poussière ne doivent donc pas provoquer de nuisance pouvant diminuer la qualité de vie du voisinage ou causer une perte de jouissance de la route publique.

Une fois ces critères pris en considération, plusieurs solutions sont ressorties. Celles-ci se divisent en deux catégories puisqu'il y a deux types de points de transfert. Il y a d'abord les solutions qui s'appliquent aux points de transfert entre deux convoyeurs, ou d'un équipement fixe comme un tamis ou un concasseur vers un convoyeur. La seconde catégorie correspond aux technologies qui s'appliquent aux points de transfert d'un convoyeur-empileur vers un empilement.

Pour les points de transfert entre convoyeurs ou équipements fixes, les solutions retenues pour l'analyse sont les suivantes :

- Le dépoussiérage (avec étanchement)
 - central
 - par unités autonomes
- L'utilisation de convoyeurs étanches doubles
- L'utilisation de convoyeurs étanches simples
- Les abat-poussières chimiques
- Les jets d'eau

Une seule solution qui semblait prometteuse au départ a été éliminée. Il s'agit de l'étanchement complet des convoyeurs avec de la toile et de la captation de la poussière par gravité à l'aide de collecteurs. En

effet, après une évaluation préliminaire, la solution ne fonctionnerait pas en raison des propriétés de la poussière émise à l'usine de Marbleton et de la faible inclinaison de la majorité des convoyeurs. Il pourrait en effet y avoir une agglomération de la poussière qui pourrait nuire au procédé.

Pour les points de transfert d'un convoyeur-empileur vers un empilement, les solutions retenues pour l'analyse sont les suivantes :

- L'utilisation de goulottes télescopiques
- Les diffuseurs circulaires à eau

Deux solutions ont également été envisagées puis abandonnées pour ces points. La première est l'échelle de pierre (traduction libre de « stone ladder »). Cette solution consiste en l'installation d'une conduite cylindrique verticale sous le point de chute d'un convoyeur-empileur. Cette conduite est percée avec des trous à différentes hauteurs. Lorsque la pierre tombe, elle reste dans la conduite, puis, une fois empilée, elle s'échappe par les trous et forme une pile autour de la conduite. (Mody et Jakhete, 1987) Cette solution a été abandonnée parce qu'elle n'est pas applicable aux convoyeurs-empileurs rotatifs et parce qu'il y aurait interférence entre les véhicules de chargement et la conduite lors du chargement de la pierre.

La seconde solution éliminée est la trémie de contrôle de la poussière. Il s'agit d'une trémie de forme conique installée sous la tête d'un convoyeur-empileur. La géométrie interne de cette trémie évacue l'air du matériel transporté. La pierre qui tombe sous la trémie devient très dense, elle est donc moins susceptible de produire de la poussière au contact de l'air et du vent. Cet équipement est conçu pour fonctionner avec un débit constant de matière ayant un diamètre maximal d'environ 20 mm. (DSH Systems Ltd., 2015) Aucun des points de transfert de convoyeur-empileur à empilement à l'usine de Marbleton ne remplit suffisamment ces critères. La trémie n'aurait donc pas l'efficacité souhaitée ou pourrait être bloquée par la pierre trop grosse. C'est pourquoi cette solution a été éliminée.

Les solutions retenues et énumérées plus haut sont décrites en détail dans le chapitre 4. Celui-ci comprend également l'analyse multicritère des solutions, dont la méthodologie est expliquée à la section 3.2.

3.3 Méthodologie d'analyse

Chacune des solutions énumérées ci-dessus a été évaluée à l'aide de critères. Ceux-ci ont été déterminés lors d'une rencontre de travail avec le directeur et le coordonnateur en environnement de l'usine de Marbleton et le spécialiste en environnement, santé et sécurité de l'est du Canada. Ceux-ci sont l'efficacité, la maturité, le coût, l'impact sur les opérations et la maintenance et l'impact sur

l'environnement et la santé et la sécurité. (Dostie et autres, 2014) L'ensemble de ces critères est détaillé plus bas.

Tous les critères sont importants au sens où chacun d'eux pourrait entraîner l'abandon d'une solution si sa performance vis-à-vis de celui-ci est inacceptable. Les critères d'efficacité et de coût ont par contre une importance supérieure par rapport aux autres. Si l'analyse de deux solutions s'avère globalement similaire, celle qui présente un meilleur rapport coût-bénéfice est privilégiée.

Les sections suivantes expliquent les critères et les tableaux 3.1 à 3.5 stipulent les résultats possibles de l'évaluation de chaque critère.

3.3.1 L'efficacité

L'efficacité réfère ici à la capacité de la solution à empêcher l'émission de poussière à un point de transfert. Elle peut s'exprimer en pourcentage de réduction par rapport à la poussière émise sans contrôle. Comme cette valeur peut être difficile à évaluer quantitativement, il s'agit souvent soit d'une approximation ou bien l'efficacité est exprimée qualitativement. L'efficacité doit également tenir compte du temps, c'est-à-dire de la pérennité des solutions. Plus l'efficacité est élevée, plus la solution est intéressante.

Tableau 3.1 : Définition du critère d'efficacité

Évaluation du critère	Efficacité
Élevée	85 % à 100 %
Moyenne	70 % à 85 %
Faible	50 % à 70 %
Inacceptable	0 % à 50 %

3.3.2 La maturité

Le critère de maturité sert à vérifier si la solution a été éprouvée. C'est en fait un gage que l'efficacité réelle correspond effectivement à la valeur fournie par le fournisseur ou obtenue pour une autre application. De plus, elle permet de vérifier si la solution est bel et bien faisable dans le contexte de cet essai et qu'elle ne se butera pas à des problèmes d'ordres technique ou opérationnel qui empêcheraient son utilisation effective.

Tableau 3.2 : Définition du critère de la maturité

Évaluation du critère	Maturité
Élevée	Solution déjà testée positivement par Graymont pour une application très similaire.
Moyenne	Solution déjà testée positivement par Graymont pour une application différente et/ou solution répandue et utilisée avec succès par d'autres industries.
Faible	Solution jamais testée par Graymont et peu répandue dans d'autres industries.

3.3.3 Le coût

Le critère du coût comprend à la fois le coût initial et les coûts récurrents. Le coût initial correspond à l'achat des équipements nécessaires, à leur installation comprenant la connexion aux réseaux électriques, d'air comprimé et d'eau de l'usine, la programmation, les contrôles et l'automatisation lorsque ces éléments sont nécessaires. Lorsque les coûts spécifiques pour l'installation ne sont pas disponibles, ils sont estimés à 16 % du coût d'achat. Pour l'électricité et les contrôles, l'estimation est de 15 %. Finalement, une contingence de 25 % du coût d'achat est ajoutée pour faire face aux imprévus. Ces valeurs ont été déterminées grâce à l'historique d'achat et d'installation de Graymont et sont utilisées pour faire l'estimation prévisionnelle des coûts de projets par l'équipe de soutien technique de Graymont. (Moreau, 2012)

Les coûts récurrents comprennent les coûts d'énergie et d'approvisionnement, que ce soit en eau ou en d'autres matières. Les coûts d'entretien sont également inclus s'ils sont importants comme les changements fréquents de pièces. Le temps d'opération et d'entretien n'est pas compté dans le coût, cet aspect est pris en compte dans le critère d'impact sur les opérations et la maintenance.

Pour pouvoir comparer les solutions entre elles, en prenant en considération le coût initial et les coûts récurrents, il faut une base identique. C'est pourquoi les coûts ont été actualisés, ce qui signifie que l'ensemble des coûts est ramené à un équivalent qui serait déboursé au moment de l'achat. Le taux d'actualisation utilisé est de 8,5 %. Il s'agit du taux utilisé pour l'ensemble des évaluations budgétaires de projets chez Graymont (Boulay, 2015).

Pour actualiser des coûts, il faut également choisir l'intervalle de temps sur lequel sont comptabilisés les coûts récurrents. Le ministère de la Fiscalité du Nevada propose une liste de durées de vie associées à des équipements spécifiques et à des industries. Pour l'industrie de la chaux, la durée de vie générale des

équipements est de 20 ans. C'est également 20 ans pour le transport de l'eau (solution des jets d'eau). (Nevada, 2013)

Il n'y a pas de données spécifiques pour les appareils de traitement de l'air (dépoussiéreurs), on suppose qu'il s'agit aussi de 20 ans. Il est très probable que certains équipements comme les convoyeurs et les dépoussiéreurs puissent durer plus longtemps, mais des réparations ou améliorations majeures risquent de devoir y être apportées au bout d'une vingtaine d'années. Pour d'autres équipements comme les goulottes télescopiques, la durée de vie risque d'être plus courte en raison de l'usure qui diffère d'une application à l'autre. La durée de vie de 20 ans constitue tout de même une estimation raisonnable qui permet de comparer l'ensemble des solutions entre elles.

De plus, pour faciliter la comparaison, les prix sont calculés pour un seul point de transfert. Même si la solution implique un coût global pour l'ensemble du secteur, celui-ci est divisé par le nombre de points de transfert pour faciliter la comparaison avec les solutions qui s'appliquent en un seul point.

La majorité de l'information utilisée pour évaluer les solutions selon le critère du coût provient de soumissions et de fournisseurs. Or, ces informations privilégiées ne peuvent pas être divulguées puisque la relation entre fournisseur et acheteur est soumise à la confidentialité pour des raisons évidentes. Les coûts ne seront donc pas fournis de façon explicite dans l'analyse. Ils seront plutôt exprimés de façon qualitative par un intervalle, l'important étant de pouvoir comparer les solutions entre elles. Aucune source ne sera fournie pour le critère du coût.

Tableau 3.3 : Définition du critère de coût

Évaluation du critère	Coût actualisé sur 20 ans par point de transfert
Inacceptable	150 000 \$ et plus
Très élevé	Entre 80 000 \$ et 150 000 \$
Élevé	Entre 50 000 \$ et 80 000 \$
Moyen	Entre 30 000 \$ et 50 000 \$
Faible	Entre 15 000 \$ et 30 000 \$
Très faible	Entre 0 \$ et 15 000 \$

3.3.4 L'impact sur les opérations et sur la maintenance

Ce critère évalue l'impact sur le temps de travail nécessaire pour opérer et effectuer la maintenance des convoyeurs et des équipements connexes qui pourraient être ajoutés pour le contrôle de la poussière. Si possible, cet impact est évalué en heures-personnes par année. Par contre, il existe peu de sources qui quantifient ce travail pour un équipement spécifique. Lorsque l'information n'est pas disponible, ce critère s'évalue donc qualitativement.

En plus du temps, ce critère prend en compte les embâcles ou facilitateurs pour l'opération et la maintenance. Par exemple, si la solution implique des équipements très difficiles d'accès ou encore si les besoins en maintenance sont très difficiles à percevoir, il y a un impact négatif sur l'opération et la maintenance.

Tableau 3.4 : Définition du critère d'impact sur les opérations et sur la maintenance

Évaluation du critère	Impact sur les opérations et la maintenance
Impact positif	La solution diminue le temps nécessaire à l'opération ou à la maintenance ou facilite le travail à effectuer.
Impact nul	La solution n'a pas d'impact sur l'opération et la maintenance.
Impact négatif faible	La solution demande des interventions ponctuelles pour la maintenance et l'opération.
Impact négatif moyen	La solution demande quelques heures de travail d'opération ou de maintenance additionnelles par semaine.
Impact négatif fort	La solution demande plusieurs heures de travail d'opération ou de maintenance additionnelles par semaine ou demande un suivi quotidien.

3.3.5 L'impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité

Ce critère a pour objectif de s'assurer qu'une solution à l'émission de poussière ne crée pas un autre problème environnemental ou social. L'émission de contaminants ou de substances dans l'environnement est considérée. La consommation de ressources en eau et en énergie est également prise en compte. Puis, la création de nuisances comme le bruit ou les odeurs et finalement la création d'un impact visuel important sont compris dans ce critère. Plus les impacts environnementaux sont importants, moins la solution est bonne selon ce critère.

De la même manière, une solution pourrait avoir un impact sur la santé et la sécurité, par exemple en ajoutant un espace clôt ou en ajoutant des sources potentielles d'accidents comme les points rentrants. Il

n'est pas souhaitable que le contrôle de la poussière génère un milieu de travail moins sécuritaire pour les employés de l'usine, la solution est donc désavantagée si elle cause de tels impacts et avantagée si elle permet d'augmenter la sécurité.

Tableau 3.5 : Définition du critère d'impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité

Évaluation du critère	Impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité
Impact positif	En plus du contrôle de la poussière, la solution diminue les impacts actuels sur l'environnement et/ou augmente la sécurité du milieu de travail.
Impact nul	La solution n'a aucun impact sur l'environnement et la santé et la sécurité.
Impact négatif faible	La solution entraîne la consommation d'une faible quantité de ressources naturelles et/ou d'énergie renouvelables et/ou la solution constitue une source de danger minime pour les employés.
Impact négatif moyen	La solution entraîne la consommation d'une grande quantité de ressources naturelles et/ou d'énergie renouvelables, de ressources ou d'énergie non renouvelables et/ou entraîne l'émission d'une quantité négligeable d'un contaminant dans l'environnement ou une nuisance mineure et/ou la solution constitue une source de danger faible pour les employés.
Impact négatif fort	La solution entraîne la consommation d'une grande quantité de ressources et/ou d'énergie non renouvelables et/ou l'émission non négligeable d'un contaminant dans l'environnement ou une nuisance.

3.4 Comparaison des solutions

Une fois chacune des solutions analysées selon les critères établis, un tableau récapitulatif a été construit de façon à pouvoir facilement comparer les solutions entre elles. Comme plusieurs critères ne peuvent pas être évalués quantitativement, le résultat de l'analyse multicritère sera qualitatif.

Il faut toutefois noter que comme les points d'émission sont variés et que des méthodes de contrôles de la poussière sont déjà en place de façon non uniforme, une seule solution ne pourra pas nécessairement être implantée partout de manière optimale.

4 ANALYSE DES SOLUTIONS

Ce chapitre présente l'analyse de chacune des solutions potentielles retenues au chapitre 3 selon les critères propres à l'usine de Marbleton. Ceux-ci sont l'efficacité, la maturité, le coût, l'impact sur les opérations et la maintenance et l'impact sur l'environnement et la santé et la sécurité.

4.2 Dépoussiérage central

Le dépoussiérage est la solution typiquement utilisée en industrie pour le contrôle de la poussière (United States. Department of Health and Human Services, 2012). Ce type de système utilise l'aspiration et la ventilation pour capter la poussière et l'entraîner dans un dépoussiéreur qui sépare l'air des particules qui s'y trouvent. Dans l'industrie de la chaux et de la pierre calcaire, les dépoussiéreurs à sac sont les plus répandus et sont efficaces pour capturer le type de poussière émise. (Houde, 2014)

Des hottes de ventilation doivent être installées à chaque source de poussière dans une position optimisant la captation. Les hottes sont ensuite reliées au dépoussiéreur par un système de ventilation. Le tout fonctionne grâce à un ou des ventilateurs qui créent une circulation d'air entraînant la poussière jusqu'au dépoussiéreur. (United States. Department of Health and Human Services, 2012)

Le dépoussiéreur est composé de sacs filtrants qui laissent passer l'air, mais retiennent la poussière. La poussière s'accumule donc sur la paroi du sac. Un système de nettoyage permet de déloger la poussière, que ce soit par jet d'air, par vibration ou par une autre méthode, et celle-ci tombe dans un collecteur. Elle est ensuite récupérée pour être réutilisée dans le procédé ou bien pour en disposer selon ses propriétés et le type d'industrie. (United States. Department of Health and Human Services, 2012)

Pour qu'un système de ventilation de ce type fonctionne adéquatement, il doit être accompagné d'autres équipements qui permettent de contenir la poussière aux points d'émissions pour qu'elle puisse ensuite être aspirée par le système. Sans ceux-ci, le système de ventilation aspire beaucoup d'air environnant non chargé de poussière inutilement. (Houde, 2014) Les équipements typiquement utilisés sont énumérés ci-dessous.

Il y a d'abord les ridelles, qui sont composées de bandes de caoutchouc installées de chaque côté du convoyeur entre la chute et la bande du convoyeur, à l'endroit où le matériau tombe sur le convoyeur. Cela permet d'isoler le point de transfert pour éviter que la poussière ne s'échappe par ces interstices. (Mody et Jakhete, 1987)

Il y a également des couvercles métalliques en forme de demi-cylindre, qui peuvent recouvrir l'ensemble du réseau de convoyeurs. Ceux-ci ne sont pas étanches, mais permettent tout de même d'isoler en partie les convoyeurs et de protéger la matière transportée des intempéries, qui peuvent soulever des nuages de poussière. (Houde, 2014)

Les chutes de têtes sont des boîtes qui recouvrent complètement la tête d'un convoyeur et qui empêchent la poussière de s'échapper en remontant vers le haut une fois le matériau déversé sur un autre convoyeur. Celles-ci sont nécessaires seulement aux points de transfert où ce type d'échappement se produit. (Houde, 2014)

4.2.1 Efficacité

L'efficacité d'un dépoussiéreur à sac est excellente. Elle dépasse 99 % pour les particules de plus de 0,3 μm (Chevalier, 1996). L'efficacité du système de ventilation et de captation de la poussière est plus difficile à évaluer, mais c'est elle qui fixe l'efficacité totale du système puisqu'elle est généralement beaucoup plus basse que celle des dépoussiéreurs (Ostavar, 2014).

Lorsque ces systèmes sont bien conçus, ils ont une grande efficacité que l'on peut estimer entre 80 % et 100 % (Ostavar, 2014). Par contre, leur efficacité a tendance à diminuer avec le temps, parce qu'ils demandent une très grande stabilité. En effet, les changements faits dans l'usine qui entraînent une augmentation ou une diminution du débit d'air à n'importe quel endroit du réseau de ventilation le déséquilibrent et en diminuent la performance. (Anonyme, 2014)

Cela peut se produire de plusieurs façons. D'abord, l'ajout d'un convoyeur peut créer un nouveau point de transfert, qui pourrait être raccordé au système de ventilation. C'est une pratique à éviter puisqu'elle change grandement l'apport en air dans une section du système. De plus, avec l'usage il se crée de l'usure dans les systèmes de ventilation, ou il peut y avoir des bris qui créent des trous dans le système de conduits de ventilation. Finalement, les opérations de maintenance et d'entretien des convoyeurs et de l'équipement en général nécessitent un accès et donc l'ouverture de trappe ou l'enlèvement temporaire de couvercles, ou d'autres pièces. Bien que temporaires, ces opérations aboutissent parfois à des oublis ou bien les pièces ne sont pas toujours replacées exactement de la même façon. Les changements, l'usure et la maintenance sont donc une source potentielle d'air indésirable dans le système ou encore de restrictions.

Il est possible d'éviter ce problème en effectuant un suivi serré du système de ventilation et en interdisant les modifications qui déséquilibreraient le réseau. Un bon programme d'inspection et de maintenance préventive permet également de détecter rapidement les bris et de changer les pièces usées, comme les ridelles, dès que c'est nécessaire. (Houde, 2014)

On peut donc dire qu'en général, peu de temps après l'installation, l'efficacité de la captation et de la ventilation est élevée. Il y a plus d'incertitude sur l'efficacité à long terme puisqu'elle dépend de comportements humains. La solution globale a donc une efficacité moyenne.

4.2.2 Maturité

Comme mentionné précédemment, le dépoussiérage central est déjà beaucoup utilisé chez Graymont et dans d'autres industries (Moreau, 2014). Ses avantages et inconvénients sont bien connus. Le niveau de maturité est donc élevé.

4.2.3 Coût

Une analyse de chaque point de transfert du secteur visé par cet essai a été réalisée à l'interne chez Graymont. Une bonne partie de l'équipement d'appoint au dépoussiérage est déjà en place. Il suffirait donc d'installer un système de ventilation avec un dépoussiéreur et de rajouter les équipements d'appoint manquants. L'ensemble des besoins a été répertorié et les coûts ont été estimés grâce à l'historique d'achat de l'entreprise. Ils comprennent l'achat d'équipements, l'installation de ceux-ci et des arrangements électriques nécessaires à leur fonctionnement.

Pour ce qui est de coûts récurrents, ceux-ci ont été estimés à l'aide de la méthodologie recommandée par l'EPA dans son guide sur les coûts du contrôle de la pollution. Ces coûts comprennent le remplacement périodique des sacs filtrants et des cages à filtres, la consommation d'électricité et d'air comprimé nécessaire à son fonctionnement. (Turner, 1998) En moyenne, les sacs filtrants doivent être remplacés tous les 2 ans, tandis que les cages sont changées environ tous les 3 ans. Le coût de remplacement correspond donc à la moyenne annuelle de ces dépenses, estimées à l'aide de l'historique d'achat. La consommation d'électricité a été calculée à l'aide de la formule de consommation fournie par Turner (Turner, 1998). Le coût a ensuite été calculé à l'aide du tarif réel de l'électricité à l'usine de Marbleton (Hydro-Québec, 2015). Pour l'air comprimé, la consommation et le coût ont été calculés à l'aide de la formule fournie par Turner (Turner, 1998). Le prix a ensuite été ajusté pour correspondre à des dollars de 2014 (Chemical Engineering, 2014; Cooper et Alley, 2011).

Contrairement à d'autres solutions, le dépoussiérage central nécessite que l'usine se débarrasse de la poussière qui est recueillie par le dépoussiéreur. Ces opérations n'entraînent pas de dépenses additionnelles puisque la poussière récupérée est réinsérée dans le réseau de convoyeurs pour servir de chaux agricole.

Le coût actualisé de cette solution se situe dans l'intervalle de coût élevé. Les coûts récurrents correspondent à un peu plus de la moitié du coût total actualisé.

4.2.4 Impact sur les opérations et la maintenance

Le nombre d'heures nécessaire pour opérer un dépoussiéreur peut être estimé à deux à quatre heures par quart de travail alors que le temps nécessaire pour la maintenance correspond à une à deux heures par quart de travail (Mody et Jakhete, 1987). Graymont possède déjà de l'expérience dans l'opération et la maintenance de ce type de système. De plus, depuis la publication des recherches qui ont permis d'établir ce temps nécessaire moyen, le niveau d'automatisation a grandement augmenté. On peut donc supposer que le temps nécessaire se situe dans le bas de l'intervalle.

Par contre, pour assurer un bon fonctionnement continu du système de ventilation, celui-ci doit faire l'objet d'inspections fréquentes et de maintenance préventive. Cela augmente le temps nécessaire à son entretien.

Malgré cela, le temps nécessaire ne devrait pas dépasser quelques heures par semaine, et les équipements ne demandent pas de suivi quotidien. Il s'agit donc d'un impact négatif moyen.

4.2.5 Impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité

L'impact le plus important causé par ce type d'équipement est le bruit. Pour la taille de dépoussiéreur nécessaire, le bruit causé peut être estimé à 82 décibels (dBA), selon l'historique de Graymont. De plus, des silencieux peuvent être ajoutés et réduire de 20 dBA le bruit produit par ces équipements. Le bruit engendré est alors peu préoccupant ce qui en fait un impact faible. (Moreau, 2014)

La demande énergétique a été estimée à environ 190 000 kilowatts-heures par an (kWh/an), ce qui correspond à la consommation annuelle moyenne d'électricité de 7,5 habitants au Québec (Québec. ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2013). Il s'agit d'une consommation assez importante, mais il s'agit d'électricité provenant majoritairement d'une source renouvelable, soit l'hydroélectricité.

Comme la solution entraîne la production d'une nuisance mineure et une forte consommation d'énergie renouvelable, l'impact est négatif et moyen.

4.2.6 Variantes

Pour augmenter l'efficacité du système de captation de la poussière, il existe des équipements d'étanchement plus efficaces que les ridelles normalement utilisées. Deux méthodes ont été trouvées lors de la recherche de solutions potentielles. Elles peuvent être utilisées ensemble ou séparément. La première est le receveur antifuite illustré à la figure 4.1. La seconde est l'utilisation de toiles taillées sur mesures et fixées avec du velcro ou un système d'élastiques autour des sources de poussière comme le montre la figure 4.2.



Figure 4.1 : Receveur antifuite (Brunone Innovation, 2012)

Le receveur antifuite consiste en deux joues installées de part et d'autre de la courroie et qui se substituent au système de soutien de la courroie de convoyeur directement sous la chute d'un point de transfert. Elle remplace donc complètement les rouleaux, les auges métalliques et les ridelles habituelles. Les joues sont soutenues par des amortisseurs qui permettent d'absorber le choc de la matière qui tombe sur la courroie. La section vers la queue du convoyeur est fermée de façon presque étanche par un panneau alors que la section vers la tête du convoyeur est fermée avec un rideau à frange.



Figure 4.2 : Étanchement par toiles (Nguyen, 2012)

Ce système permet d'éviter l'usure rapide des ridelles causée par le contact perpendiculaire de celles-ci avec la courroie. Il permet donc une meilleure étanchéité du point de transfert et donc une meilleure efficacité du système de captation. La poussière émise est donc forcément moindre. De plus, comme les joues sont très épaisses et positionnées presque parallèlement à la courroie, elles s'usent plus lentement que les ridelles. Le remplacement des joues et la maintenance nécessaire sont donc moins fréquents qu'avec le système habituel. (Gravelle, 2015)

L'installation de receveurs antifuite à chaque point de transfert entraînerait une augmentation de 7 à 10 % du coût initial du système de dépoussiérage. L'augmentation du coût actualisé est de l'ordre de 4 à 5 %.

La variante d'étanchement avec de la toile est une option d'étanchement ponctuelle. En effet, compte tenu de l'humidité contenue dans la poussière qui la rend collante, il n'est pas possible d'étancher complètement le réseau de convoyeurs de cette façon. Par contre, la toile peut servir à certains points précis d'où s'échappe de la poussière. L'avantage de ce matériau est qu'il est très léger et peut donc être fixé avec du velcro ou des élastiques, ce qui permet d'accéder facilement aux équipements en cas de

besoin. Cette variante permet donc d'augmenter localement l'efficacité d'un système de dépoussiérage sans avoir d'impact significatif sur la maintenance. Elle peut d'ailleurs être utilisée conjointement avec n'importe quelle solution pour augmenter l'étanchement du système de convoyeurs.

L'utilisation ponctuelle de toiles pour étancher le réseau de convoyeurs pourrait entraîner une augmentation d'environ 5 % du coût initial du système de dépoussiérage. Par contre, ce coût peut varier énormément en fonction du nombre d'endroits où la toile est utilisée, quelle taille a le recouvrement ainsi que la complexité de confection des morceaux, puisque ceux-ci doivent être faits sur mesure. C'est pour cette raison que cette variante ne se retrouve pas dans le tableau récapitulatif du chapitre 5, mais qu'elle fait tout de même partie de l'analyse.

4.3 Dépoussiérage par unités autonomes

Cette solution consiste en l'installation de plusieurs petites unités de dépoussiérage à chaque point d'émission de poussière. Ces unités fonctionnent de la même façon que le système de dépoussiérage de la section 4.1 avec des sacs filtrants autonettoyants. La différence majeure est qu'il n'y a pas de réseau de ventilation. En effet, les unités dépoussièrent directement le point de transfert qui se retrouve en dessous d'elles. L'autre distinction est que la poussière collectée est rejetée directement sur le convoyeur chaque fois que les filtres se nettoient. (Savard, 2014)

Il existe aussi des unités autonomes avec des bacs de récupérations (France air, 2012). La poussière n'est donc pas retournée sur le convoyeur dépoussiéré, elle doit être récupérée et il faut en disposer. Pour éviter l'obligation de gérer de la poussière provenant de multiples points de collecte, les unités sans bacs sont préférables. Mais des unités avec bacs sont équivalentes et peuvent être utilisées aussi lorsque le rejet de la poussière sur le convoyeur occasionne des inconvénients.

Ce type d'équipement s'installe avec des accessoires d'étanchéité qui permet de contenir la poussière au point de transfert et donc au point d'aspiration. Comme pour la solution 4.1, les ridelles et les rideaux typiques peuvent être utilisés. Des techniques plus poussées, comme le receveur antifuite, peuvent également servir.

4.3.1 Efficacité

L'efficacité des dépoussiéreurs est encore une fois très élevée. C'est la captation de la poussière qui détermine l'efficacité totale de la solution. Si le point de transfert est bien isolé, l'efficacité peut être très

élevée, soit entre 80 % et 100 %, comme pour le dépoussiérage central (Ostavar, 2014). L'avantage des unités autonomes est qu'elles restent toujours aussi efficaces. Comme il n'y a pas de réseau de ventilation, le système ne peut pas devenir déséquilibré avec le temps. L'aspiration demeure constante et appropriée au point de transfert, l'efficacité ne diminue donc pas. Il s'agit d'un gros avantage par rapport au dépoussiérage central. L'efficacité est donc élevée.

4.3.2 Maturité

Comme il s'agit de technologie de dépoussiérage typique, ces équipements ont fait leur preuve. Par contre, les petites unités autonomes ne sont pas répandues chez Graymont. La maturité est donc moyenne.

4.3.3 Coût

Selon des soumissions demandées pour le type d'unité qui serait nécessaire, chacune des unités de dépoussiérage a un coût beaucoup plus faible qu'un dépoussiéreur central. Par contre, il faut en installer à chaque point de transfert. Comme il y a plusieurs emplacements, les frais de design, notamment pour la structure de soutien, sont plus élevés parce que chaque point est différent. L'installation totale demande aussi plus de temps. Mais comme il n'y a pas de système de ventilation, ces coûts sont complètement compensés. L'installation d'unités autonomes sur l'ensemble du secteur de l'usine a un coût initial qui correspond à environ 80 % de celui d'un système central.

Les coûts récurrents sont les mêmes puisqu'il s'agit de la même demande énergétique totale et de la même fréquence de remplacement des filtres et des cages. Le coût total actualisé correspond à environ 90 % du coût d'un système central. Cette solution entre donc dans l'intervalle de coût élevé.

4.3.4 Impact sur les opérations et la maintenance

Les unités autonomes nécessitent du temps d'opération et de maintenance, au même titre que le dépoussiérage central. Mais comme il y a plusieurs unités situées à des endroits différents, les tournées d'inspection et de maintenance sont nécessairement plus longues. Cela pourrait signifier plusieurs heures par semaine. L'impact est donc négatif et élevé.

En fait, les opérateurs et les responsables de la maintenance préfèrent en général avoir le moins d'équipement possible à leur charge, parce que chaque équipement de plus représente du temps et des problèmes potentiels supplémentaires (Gravelle, 2015). Pour qu'une solution soit efficace, elle doit avoir

l'appui du personnel qui s'en occupe. L'ajout d'autant de nouveaux équipements pourrait entraîner une réticence chez les employés, ce qui est un désavantage notable.

4.3.5 Impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité

Les deux impacts sur l'environnement sont la création de bruit et la consommation d'énergie. Puisqu'il y a plus d'équipement, le bruit total pourrait être plus élevé que pour un dépoussiéreur central, mais comme l'utilisation de silencieux est possible, le bruit total ne devrait pas être problématique. Pour l'énergie, la consommation totale est la même que pour le dépoussiérage central. Il n'y a pas d'impact sur la santé et la sécurité. L'impact total est donc négatif moyen.

4.4 Utilisation de convoyeurs étanches doubles

Cette solution consiste à contenir la poussière en enfermant tout le convoyeur, y compris le retour de la courroie de façon étanche. La poussière est tout de même émise aux points de transfert et s'accumule sous le convoyeur, à l'intérieur de l'enceinte étanche. Comme le système est clos, la poussière peut se répandre loin des points de transfert puisqu'un courant d'air se crée dans la direction du mouvement du convoyeur. Cette accumulation de poussière est évacuée grâce à un convoyeur à chaîne situé sous le convoyeur à courroie, au bas de l'enceinte étanche. (Nguyen, 2014)

Un convoyeur à chaîne de type racloir est utilisé. Il s'agit d'une ou de deux chaînes entraînées par un moteur rotatif, sur lesquelles sont fixés des racloirs. Ces derniers peuvent être constitués de divers matériaux en fonction de la matière à transporter. Dans le cas de la poussière, le bois, le caoutchouc ou le plastique pourraient être envisagés. Les racloirs épousent la surface d'un couloir ou d'une gouttière (le fond de l'enceinte étanche du système) et entraînent la matière qui s'accumule dans celle-ci. (American Chain Association, 2006) La figure 4.3 illustre un tel convoyeur.

La solution proposée consiste donc en deux convoyeurs installés l'un par-dessus l'autre, le convoyeur à courroie transportant la pierre et le convoyeur à chaîne transportant la poussière. Le convoyeur à chaîne achemine la poussière jusqu'à une trémie, qui lui permet de s'accumuler dans un bac de récupération. Celui-ci doit être vidé périodiquement.



Figure 4.3 : Convoyeur à chaîne (ChinA-ogpe.com, 2015)

Cette solution implique également que tous les points de transfert soient munis de chutes étanches qui relient les segments de convoyeurs les uns aux autres. Sans celles-ci, la poussière s'échapperait complètement par ces points.

Cette solution est plus facilement utilisable lorsque les installations sont conçues pour l'accueillir. L'installation de ce système sur des convoyeurs existants peut en effet causer certains problèmes. D'abord, la structure qui soutient les convoyeurs à courroie actuels a été conçue pour leur poids uniquement. Rajouter un convoyeur à chaîne sur toute la longueur rajoute un poids important qui pourrait solliciter un renforcement de la structure.

De plus, l'espace n'est pas nécessairement disponible pour accommoder un second convoyeur et le système de collecte de la poussière. Les queues de plusieurs convoyeurs sont situées près du sol, dont celle des convoyeurs-empileurs. Il pourrait ne pas y avoir assez de place pour insérer une trémie et un bac de récupération dans la configuration actuelle. Cela implique qu'il faudrait possiblement creuser dans le sol pour installer le système de récupération.

Les opérations de vidange des bacs de récupération demandent aussi un certain espace et un accès pour un chariot élévateur à fourche ou n'importe quel autre véhicule utilisé pour retirer le bac et le vider. À moins d'avoir un convoyeur vraiment encombré ou inaccessible, ce problème peut se régler en aménageant la queue du convoyeur adéquatement.

Finalement, si cette solution est utilisée sur des convoyeurs empileurs, le mouvement du convoyeur demandera des adaptations. En effet, le pivot de ces convoyeurs n'est pas situé directement sous leur queue, mais plutôt entre 1 et 3 mètres environ de la queue, pour laisser la place au moteur derrière le point de chute. La queue effectue donc elle aussi un mouvement de rotation autour du pivot, quoique d'une moins grande amplitude. La trémie et le bac de récupération doivent donc suivre ce mouvement. Cela implique l'installation d'un système mobile, sur roues par exemple, qui complique encore une fois le système.

Bref, en termes de faisabilité technique, cette solution est possible, mais elle demande des adaptations aux systèmes de convoyeurs actuels. Pour un nouveau convoyeur par contre, la faisabilité technique a déjà été vérifiée.

4.4.1 Efficacité

En théorie, si le système est bien étanche, il ne devrait y avoir aucune fuite de poussière. Le seul risque potentiel est lors de la vidange de la trémie ou du bac de poussière, d'où l'importance de bien choisir celui-ci. L'efficacité pourrait donc être évaluée entre 95 % et 100 % et tombe donc dans l'intervalle d'efficacité élevée.

4.4.2 Maturité

Ce type de système est utilisé dans une usine de Graymont en Pennsylvanie et remplit bien sa fonction (Moreau, 2015). Le même type d'équipement est utilisé dans l'usine de Lime McDonald en Nouvelle-Zélande et qui est un leader dans le contrôle de la poussière. La technologie a donc déjà été testée avec succès (Nguyen, 2014). La maturité est donc élevée.

4.4.3 Coût

Ce type de système se vend clé en main, c'est-à-dire que les deux convoyeurs et leur contenant étanche sont achetés ensemble. Dans le cas d'une installation existante, le convoyeur à courroie est déjà en place, mais la configuration actuelle ne laisse pas suffisamment d'espace pour insérer un convoyeur à chaîne entre le convoyeur à courroie et la structure. Il faut donc soit enlever le convoyeur actuel et installer un nouveau système étanche à double convoyeur complet à la place ou bien modifier les installations existantes pour relever le convoyeur à courroie, insérer un convoyeur à chaîne en dessous et ajouter une enceinte étanche tout autour.

Le prix d'un système complet clé en main a été obtenu par l'historique d'achat de Graymont, qui s'est procuré ce type d'équipement une fois en 2006. Le montant a été ramené à sa valeur de 2014. Pour ce qui est de l'adaptation du système actuel, les coûts sont difficiles à évaluer sans demander à un entrepreneur de faire une évaluation détaillée. L'adaptation du système actuel permettrait d'économiser sur les frais d'achat du convoyeur à courroie qui est déjà présent et qui n'a pas besoin d'être remplacé. Par contre, les installations doivent être modifiées pour accommoder le convoyeur à chaîne, ce qui entraînerait des coûts supplémentaires importants. De plus, comme le système ne serait pas acheté en une seule pièce, l'enceinte étanche risque de devoir être faite sur mesure ou au minimum devoir subir quelques modifications. Cela augmentera les coûts de façon considérable aussi. Le coût d'un convoyeur à chaîne seul correspond environ à la moitié du coût du système complet (Peters et autres, 2003). Mais en ajoutant le prix de l'adaptation des convoyeurs à courroie actuels et de l'enceinte étanche, les économies pourraient disparaître.

Pour ce qui est des coûts récurrents, il y a d'abord le coût de l'énergie nécessaire à la propulsion du convoyeur à chaîne. La demande énergétique exacte peut et doit être calculée de façon précise pour choisir un moteur approprié. Ces calculs demandent une connaissance de multiples paramètres, comme le type exact de convoyeur, les matériaux le constituant, les dimensions du convoyeur et son inclinaison. Une analyse aussi poussée n'est pas nécessaire à ce stade du projet. En considérant que la masse de poussière à évacuer est très faible comparativement à la masse de pierre transportée et que le convoyeur n'a donc pas à être en mouvement de façon continue, on considère que les coûts d'énergie sont négligeables. Cela est d'autant plus raisonnable en comparaison avec le prix élevé de l'achat initial.

Ce type d'appareil est fait pour être opéré dans des conditions d'exploitation difficile et peut tolérer un certain degré de corrosion et d'abrasion, les bris nécessitant des réparations ne sont donc pas fréquents (American Chain Association, 2006). Parmi les autres coûts récurrents, il y a les racloirs qui devront être changés périodiquement en fonction de leur usure ou en cas de bris. Les convoyeurs à chaîne doivent également être lubrifiés occasionnellement. Cela implique des coûts récurrents totaux faibles. (American Chain Association, 2006)

Le coût total actualisé est inacceptable puisqu'il est supérieur à 150 000 \$. La fraction des coûts récurrents s'élève à moins de 8 % du coût total pour l'ensemble de la durée de vie de l'équipement.

4.4.4 Impact sur les opérations et la maintenance

Pour être installée, cette solution implique soit de remplacer les convoyeurs actuels ou de modifier leur configuration, ce qui nécessitera obligatoirement un arrêt du système sur plusieurs jours ou même plusieurs semaines. L'installation peut bien sûr être synchronisée avec un arrêt des opérations prévu pour une autre raison, mais cela diminue la flexibilité et entraîne des contraintes de temps et d'espace pendant l'installation, puisque ces moments sont utilisés pour toutes sortes d'opérations de maintenance.

Une fois installé, comme il y a le double de convoyeurs, le temps passé à la maintenance préventive et corrective augmentera. Les inspections devront inclure les convoyeurs à chaîne et l'enceinte étanche du système de convoyeurs. Le remplacement des racloirs, de même que l'entretien des moteurs et des chaînes devront également être intégrés à la routine de maintenance. Par contre, les convoyeurs sont une technologie simple, et comme mentionné précédemment, les changements de pièces et les bris sont peu fréquents.

De plus, la poussière accumulée dans les bacs de récupération doit être retirée périodiquement. Cela ajoute une tâche d'opération à laquelle un opérateur devra consacrer du temps. L'impact sur les opérations, compte tenu de l'installation et de la récupération de la poussière, est élevé.

En tenant compte de la maintenance et de l'opération, quelques heures tout au plus doivent être consacrées chaque semaine à cet équipement. L'impact est donc négatif et moyen.

4.4.5 Impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité

L'impact principal de cette solution est le bruit engendré par les convoyeurs à chaîne. Certains convoyeurs à chaîne existants font un bruit très dérangeant, qui exige le port de protection auditive lorsque l'on se trouve à proximité et qu'ils sont en fonctionnement. C'est ce qui a été constaté lors de la visite de l'usine de Graymont à Exshaw, qui possède un tel convoyeur. C'est pourquoi le choix du matériau des racloirs à grande importance. Les matériaux comme le bois, le plastique ou le caoutchouc sont à privilégier puisqu'ils font beaucoup moins de bruit lors du frottement contre le métal, comparativement au bruit du métal sur le métal. En considérant comme prioritaire le critère du bruit lors du choix du convoyeur et de ses matériaux, l'impact sonore pourrait être faible, il y a tout de même création d'une nuisance mineure.

L'opération de plus de convoyeurs implique aussi une augmentation de la demande énergétique de l'usine. Cet impact est jugé faible considérant l'ampleur de la facture énergétique existante et du fait qu'il s'agit d'électricité provenant d'une source renouvelable, soit l'hydroélectricité.

Il n'y a pas de nouveaux dangers pour la santé et la sécurité des employés. Puisque les convoyeurs sont complètement recouverts, les points rentrants existants sont éliminés. L'impact sur la santé et la sécurité est donc positif. L'impact global est donc négatif et moyen.

4.5 Convoyeurs étanches simples

Cette solution consiste à modifier les convoyeurs actuels pour les rendre étanches. Deux entreprises fournissent des produits qui sont conçus pour s'ajouter aux systèmes existants et qui permettent de contenir la poussière complètement. La figure 4.4 illustre la technologie qu'ils proposent.

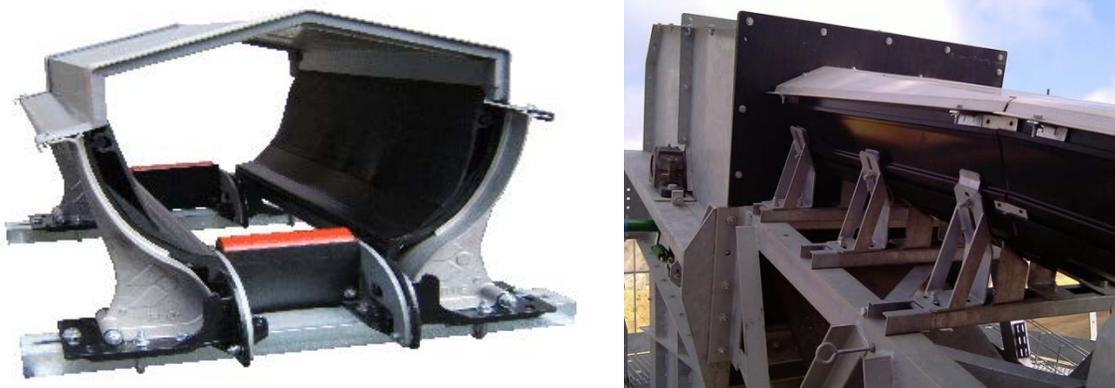


Figure 4.4 : Convoyeurs Liftube sans la courroie et Transpar Ex (Stanam Industries, s. d.a; Brunone innovation, s. d.)

Le concept consiste à utiliser la courroie existante, mais plutôt que de la positionner presque à plat sur trois rouleaux, elle est positionnée en forme de U, comme pour les receveurs antifuite de la section 4.1.6. Cela permet d'appuyer la courroie sur une rive de chaque côté, qui lui est parallèle. La bande glisse donc sur ces rives avec un contact léger, contrairement à l'utilisation typique de ridelles donc le contact est perpendiculaire. L'usure se fait donc plus graduellement et les rives doivent être changées moins souvent que les ridelles. Un capot amovible est ajouté sur le dessus, ce qui enferme complètement la partie de la courroie qui transporte le matériel. L'ensemble du poids de la courroie et de son contenu est soutenu par un rouleau. Il faut donc retirer les deux rouleaux latéraux de chaque point d'appui qui sont actuellement utilisés. (Stanam Industries, s. d.b)

Ces équipements sont vendus en sections d'un mètre qui peuvent être installées bout à bout. La longueur totale peut donc être choisie pour couvrir l'ensemble d'un convoyeur ou seulement une section. Ils s'installent normalement à partir du bas d'une chute jusqu'à la longueur désirée. Les deux extrémités de

convoyeur étanche sont fermées à l'aide de rideau. Celui de la queue est solide tandis que l'autre est fait avec un rideau flexible qui laisse passer la matière convoyée, mais qui empêche la poussière de s'échapper complètement dans l'air. (Stanam Industries, s.d.b)

Pour que la poussière ne s'échappe pas à partir du haut du point de transfert, qui n'est pas couvert par la partie étanche du convoyeur, celui-ci doit être couvert complètement avec une chute de tête. La chute doit également être étanche.

Il faut noter que cet équipement n'est fait que pour les convoyeurs conventionnels et ne peut pas s'installer sur des convoyeurs-empileurs.

4.5.1 Efficacité

Un convoyeur de type Lifttube a pu être observé en fonctionnement. Ce type de convoyeur est complètement étanche, sauf à l'extrémité qui donne sur la tête du convoyeur. Si les chutes sont bien étanches, il n'y a donc pas d'échappement de poussière. Par contre, le rideau qui laisse passer la pierre au bout du dernier segment de convoyeur étanche peut laisser de la poussière s'échapper. Comme l'ensemble du système est étanche, il se crée un courant d'air dans la direction de la matière transportée. L'air entraîne la poussière qui tend à être rejetée à l'extrémité. C'est ce qui a été observé, malgré la présence de rideau, lors de deux visites pour voir ces équipements à l'œuvre.

Pour éviter ce problème, plusieurs solutions sont envisageables. D'abord, il est possible de rendre le convoyeur étanche sur l'ensemble de sa longueur, plutôt que seulement près du point de transfert. Pour les convoyeurs plutôt courts, c'est une option faisable. Par contre, certains convoyeurs sont très longs, soit plus de 100 m, ce qui peut être un problème puisque cela augmente le coût de la solution. Pour ceux-ci, des rideaux comme celui installé à l'extrémité de tête peuvent être installés entre chaque segment de convoyeur pour ralentir la circulation de l'air et permettre aux particules de se déposer. Il faut alors un segment étanche suffisamment long pour laisser le temps à l'ensemble des particules de se déposer. Cette longueur varie en fonction de la vitesse de l'air (et donc du convoyeur), du type et du débit de particules. Des calculs d'ingénierie permettraient d'estimer cette longueur, mais celle-ci devrait être confirmée par un essai réel sur convoyeur.

Si le convoyeur étanche est installé sur toute la longueur du réseau de convoyeur, l'efficacité est près de 100 % pour les points de transfert. C'est donc une efficacité élevée. Si le convoyeur n'est pas

complètement couvert, l'efficacité est inconnue. Il faudra tester différentes longueurs pour déterminer ce qui donne une efficacité suffisante.

4.5.2 Maturité

Graymont a déjà testé ces équipements récemment et a pu confirmer qu'ils sont bien étanches et faciles d'utilisation, même si l'objectif de leur installation n'était pas le contrôle de la poussière (Couture, 2014). De plus, ceux-ci sont de plus en plus répandus dans l'industrie du ciment, très semblable à celle de la chaux (Stanam industries, 2014). Par contre, la longueur nécessaire pour que la poussière retombe et ne sorte pas au bout des convoyeurs étanches est inconnue, donc il reste de l'expérience à acquérir. La maturité est donc moyenne.

4.5.3 Coût

Le coût initial de cette solution a été évalué grâce au prix d'achat obtenu lors de l'essai de cette technologie à l'usine de Bedford récemment et une nouvelle soumission demandée pour Marbleton.

L'utilisation d'un convoyeur étanche n'entraîne pas de coûts récurrents. En effet, le convoyeur continue d'être propulsé par les mêmes moteurs. Le coût de maintenance pour le remplacement des pièces usées est comparable à celui d'un convoyeur normal.

Pour couvrir l'ensemble du réseau de convoyeur sur toute sa longueur, le coût initial serait environ 70 % plus élevé que l'installation d'un système typique de dépoussiérage central. Par contre, le coût total actualisé est pratiquement égal puisque les coûts de fonctionnement d'un système de dépoussiérage sont beaucoup plus élevés que ceux des convoyeurs étanches simples qui sont nuls.

De plus, il est peu probable qu'il faille couvrir la totalité du réseau de convoyeurs pour obtenir l'efficacité désirée. Si l'on suppose une longueur couverte de 10 m, le coût chute d'environ 66 %, et si la longueur est de 3 m, le coût est réduit de 80 %. Dans les deux cas, les convoyeurs étanches simples deviennent plus avantageux que le système de dépoussiérage, autant pour le coût initial que pour le coût total.

Pour une couverture complète, le coût total entre dans l'intervalle de coût élevé, pour 10 m, dans l'intervalle de coût faible et pour 3 m, dans l'intervalle de coût très faible.

4.5.4 Impact sur les opérations et la maintenance

Pour l'installation, cette solution exige un arrêt du convoyeur. Mais celle-ci est d'assez courte durée puisque les équipements sont conçus pour s'ajouter au système existant. Il n'y a donc pas de modifications à faire sur la structure ou sur la configuration actuelle des équipements. De plus, l'ajout de ces équipements n'entraîne pas de temps d'opération supplémentaire. Donc l'impact est faible et ponctuel. (Stanam Industries, s.d.b)

Pour ce qui est de la maintenance, comme mentionnée plus haut, ce système ne nécessite pas plus de maintenance qu'un convoyeur à courroie normal. Il faut bien sûr adapter les procédures de vérification puisque plusieurs composantes sont différentes, mais en termes de temps nécessaire, il n'y a pas de besoin supplémentaire. (Stanam Industries, s.d.b) L'impact sur les opérations et la maintenance est donc nul.

4.5.5 Impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité

L'utilisation d'un convoyeur étanche n'a pas d'impact additionnel comparativement à un convoyeur normal sur l'environnement. De plus, le fait d'enlever les rouleaux latéraux permet d'enlever des points rentrants qui peuvent être une source de blessures. L'impact est donc positif pour ce qui est de la santé et la sécurité et nul pour l'environnement.

4.6 Abat-poussière chimique

Les abat-poussières chimiques sont des produits qui sont ajoutés à une surface ou un matériau et qui en réduisent l'émission de poussière (United States. US EPA, 2002). Il en existe plusieurs types dont les sels et les saumures, les lignosulfates, les sucres organiques et les huiles d'origine pétrolière (United States. US EPA, 2002). L'application la plus répandue des abat-poussières est le contrôle de la poussière provenant des routes non pavées, mais certains fournisseurs proposent également des solutions pour la pierre concassée en manutention.

L'application d'un abat-poussière chimique sur un sol ou un matériau a pour effet de changer les propriétés physiques du matériau. Il entoure les particules et leur permet de s'agglomérer, ce qui les rend plus lourdes et donc moins sujettes à devenir en suspension dans l'air. (United States. US EPA, 2002)

L'application sur la pierre concassée se fait sous forme liquide à l'aide d'un système de pompage et de buses. Celles-ci pulvérisent le liquide en fines gouttelettes qui se déposent sur la surface de la pierre alors

qu'elle est transportée sur un convoyeur. (IPAC Chemicals Ltd., 2011) Un réservoir est également nécessaire pour entreposer le produit.

Le produit peut être appliqué directement à la sortie du concasseur et devrait limiter l'émission de poussière aux points de transfert suivants.

4.6.1 Efficacité

Il n'y a pas d'étude crédible sur l'efficacité des abat-poussières chimiques pour la pierre concassée, puisqu'il s'agit d'une application peu répandue. Le fournisseur Power Chemicals Ltd annonce son produit comme étant efficace à plus de 80 %. Il fournit des photos d'un point de transfert avec et sans abat-poussière qui corrobore cette affirmation. On peut donc estimer l'efficacité des abat-poussière chimique à 80 % pour un point de transfert. (Power Chemicals Ltd, 2011) Bien sûr, tous les produits ne sont pas également efficaces et un test préalable à l'achat des installations nécessaires à l'utilisation permanente d'un abat-poussière chimique devrait être effectué pour s'assurer de son efficacité.

De plus, même s'ils sont sous forme liquide, les produits proposés ont un point de congélation inférieur à -40° degrés Celsius, ce qui permet de les utiliser à longueur d'année dans les conditions météorologiques du Québec.

Il n'est pas spécifié si l'efficacité est altérée lorsque le produit passe par plusieurs points de transfert après l'application du produit. Il est possible que celle-ci diminue à chaque point de transfert puisque la pierre est remaniée et qu'elle est sujette à du frottement. Il n'est pas possible d'estimer cet effet, cela devrait être confirmé avec un test sur place. L'efficacité est donc moyenne, et pourrait être plus basse pour plusieurs points de transfert.

4.6.2 Maturité

L'utilisation des abat-poussières pour limiter l'émission de poussière par la circulation sur les routes non asphaltées ou sur des empilements est très répandue. Les applications sur la pierre concassée et l'efficacité sur l'émission de poussière par la manutention sont beaucoup moins fréquentes. Graymont n'a jamais utilisé de tels systèmes sur l'ensemble de ses installations de convoyeurs. Par contre, un abat-poussière a déjà été essayé et a fait ses preuves pour un seul point de transfert. Il n'est pas encore possible de conclure pour plusieurs points de transfert. La maturité est donc faible.

4.6.3 Coût

Le coût de cette solution a été estimé grâce à une soumission d'un fournisseur de la Colombie-Britannique. Les frais d'installation de l'équipement nécessaire incluant le réservoir, le système de pompage et les buses sont assez modestes. Par contre, l'achat répété du produit entraîne des coûts récurrents très importants puisque le produit lui-même est très dispendieux. Le coût actualisé de cette solution est inacceptable puisqu'il est beaucoup plus élevé que 150 000 \$ par point de transfert. La fraction du prix total provenant de l'achat initial ne représente que 10 % du coût total actualisé.

Il existe peut-être des produits moins dispendieux qui pourraient être utilisés dans les mêmes conditions. Il faudrait faire plusieurs demandes de soumissions pour trouver le meilleur prix.

4.6.4 Impact sur les opérations et la maintenance

Le système d'application de l'abat-poussière chimique s'installe sur le premier convoyeur après le concassage. Le système de manutention actuel n'a pas à être modifié. L'installation pourrait exiger l'arrêt d'une très courte durée du convoyeur en question, mais ne devrait pas autrement impacter les opérations.

La livraison périodique de l'abat-poussière pourrait au début demander la supervision d'un employé de l'usine. Mais, le fournisseur devrait pouvoir faire l'ensemble des opérations par lui-même rapidement. La livraison ne devrait donc demander qu'une très faible contribution en temps de main-d'œuvre pour l'usine.

Pour ce qui est de la maintenance, l'avantage de cette solution est que le produit utilisé a des caractéristiques chimiques et physiques connues et contrôlées à la fabrication. Il n'y a donc normalement pas d'impuretés ou de matière en suspension qui pourraient colmater ou endommager les buses, comme c'est souvent le cas avec de l'eau de source naturelle. Celles-ci seront tout de même sujettes à l'usure, à l'érosion et à la corrosion, dépendamment des propriétés du produit. Il peut aussi y avoir agglomération de matière à l'extérieur des buses, ce qui peut entraver la sortie du liquide ou modifier sa distribution. Cela est particulièrement plausible considérant que le point d'application se trouve juste après le concasseur et donc dans un milieu qui peut contenir de la poussière en suspension. (United States Department of Health and Human Services, 2012)

Le système demandera donc seulement des inspections préventives périodiques des buses, du système de pompage et du réservoir, pour repérer et réparer un dommage éventuel. Considérant la simplicité du

système, cela ne devrait représenter que quelques heures de travail par année. L'impact total sur les opérations et la maintenance est donc faible.

4.6.5 Impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité

Les abat-poussières peuvent avoir des impacts environnementaux importants en fonction de leur composition. Ces impacts ont été l'objet de nombreuses études dans le cas d'une application sur route. Il n'en ressort néanmoins pas de résultat catégorique, puisque certaines études montrent des impacts négatifs alors que d'autres non (Descôteaux, 2012). Les produits organiques d'origine pétrolière semblent être les abat-poussières ayant le plus d'impacts négatifs (United States. US EPA, 2002) alors que les produits à base de sucres organiques seraient les moins dommageables (Loreto et autres, 2002).

Dans le cas de l'application sur la pierre, l'abat-poussière peut se retrouver dans l'environnement de deux manières. D'abord, lors de l'entreposage de la pierre en piles ou lors de son utilisation comme pierre de construction en remblais, la pierre est directement exposée au ruissellement des précipitations. L'abat-poussière peut donc être entraîné dans le réseau hydrique et pénétrer dans le sol. Les impacts seront donc comparables à ceux engendrés par l'épandage d'abat-poussières sur les routes. Puis, pour la pierre alimentant les fours de production de chaux, l'abat-poussière brûle et ses produits de combustion se retrouvent dans l'atmosphère. Ce type d'impact n'a pas fait l'objet d'études. La température élevée d'un four à chaux devrait permettre la combustion complète de la majorité des abat-poussières et entraîner surtout l'émission des produits typiques de combustion soit le CO₂ et la vapeur d'eau. Il pourrait tout de même y avoir une faible production de produits toxiques ou dommageables pour l'environnement.

Plusieurs fournisseurs d'abat-poussières décrivent leurs produits comme étant respectueux de l'environnement et sans impact. Il est difficile de vérifier cette information puisque la recette ou la formule chimique de leurs produits n'est pas publiée, puisqu'il s'agit de secrets commerciaux.

Une manière de s'assurer que l'abat-poussière est non dommageable pour l'environnement est de vérifier qu'il est approuvé par une instance gouvernementale crédible. Le bureau de normalisation du Québec (BNQ) fournit la norme BNQ 2410-300 sur les produits utilisés comme abat-poussières pour routes non asphaltées et autres surfaces similaires. Une certification selon cette norme permet d'assurer que les exigences écotoxicologiques stipulées par la norme sont respectées. Celle-ci ne s'applique pas directement à la pierre concassée, mais l'effet environnemental de son utilisation sur la pierre devrait être semblable, comme discuté précédemment. L'impact résultant de la combustion n'est par contre pas considéré et devrait faire l'objet d'une vérification. (BNQ, 2009)

Bref, il y a une certaine incertitude sur l'impact environnemental potentiel des abat-poussières. Pour ce qui est de la santé et de la sécurité, aucun impact n'est répertorié. Comme il y a un risque d'émission de contaminant dans l'environnement, l'impact est jugé moyen.

4.7 Les jets d'eau

Il existe deux approches d'utilisation de l'eau pour le contrôle de la poussière. Il y a d'abord l'approche préventive qui consiste à arroser la pierre avant un point de transfert pour éviter que la poussière ne soit émise. Puis, l'approche corrective consiste à arroser l'air chargé de poussière pour la faire retomber. Dans le premier cas, le fait d'arroser la pierre permet aux particules d'y rester attachées. Leur poids plus grand à cause de l'eau, ainsi que la tension de surface de l'eau rend plus difficile la séparation des particules et les empêchent donc de se retrouver en suspension dans l'air. Dans le second cas, l'eau alourdit les particules déjà en suspension. Elle leur permet également de s'agglomérer, ce qui les fait retomber. (United States. Department of Health and Human Services, 2012)

Généralement, pour un point de transfert entre deux convoyeurs, le système de jets d'eau utilise les deux approches et ressemble à celui illustré à la figure 4.5.

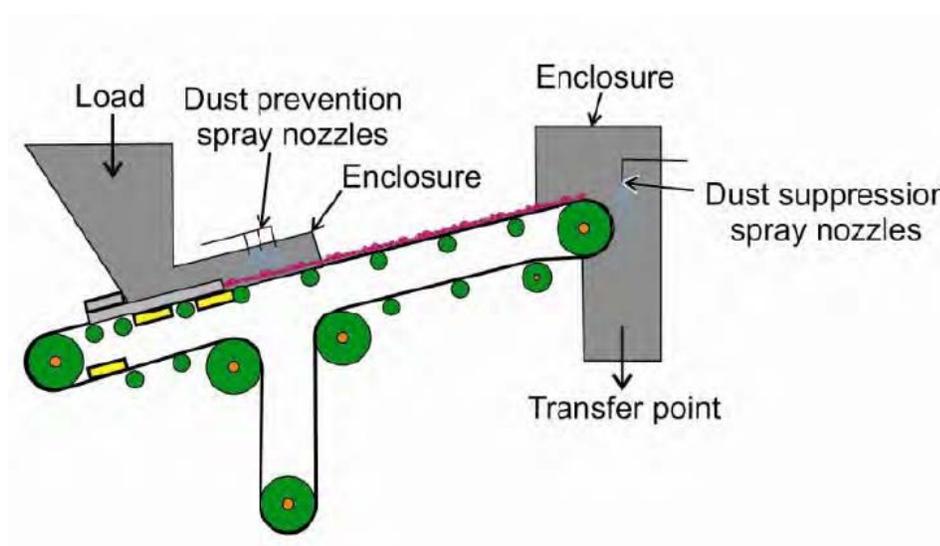


Figure 4.5 : Point d'application typique de jets d'eau (United States. Department of Health and Human Services, 2012)

Le système est composé d'une source d'eau et d'un réseau de conduits permettant d'acheminer l'eau vers les points d'émission. L'eau est propulsée par un système de pompage, vers des buses qui pulvérisent l'eau en gouttelettes. C'est le même concept que pour l'abat-poussière chimique. La principale différence

concerne l'approvisionnement, puisque l'eau est disponible naturellement, en opposition aux produits chimiques, et qu'elle est utilisée à un débit plutôt constant. Un réservoir n'est donc pas nécessaire. (Spraying Systems Co., 2008)

L'eau peut être captée dans un écoulement naturel de surface ou dans une nappe souterraine grâce à un puits. Si l'aqueduc était disponible, ce serait aussi une option envisageable. Le problème avec l'eau naturelle, c'est qu'elle peut contenir des matières en suspension ou des composés, contenant par exemple du carbonate, qui se précipitent dans les conduits. C'est particulièrement le cas pour le site à l'étude puisque l'usine se trouve sur un gisement de calcaire, les eaux sont donc très exposées au carbonate par le sol et par les émissions actuelles de poussière de calcaire. Cela signifie que la station de pompage doit être accompagnée d'une station de traitement de l'eau. Sans avoir d'analyse de la qualité de l'eau, il est difficile de prévoir exactement quels traitements seraient nécessaires. Certains composés chimiques qui précipitent pourraient être difficiles, voire impossibles à enlever, et pourraient mettre en cause la faisabilité technique de la solution. En général, un système de filtration est suffisant. La présence de carbonate peut par contre exiger un suivi et une maintenance plus serrés du système. (United States. Department of Health and Human Services, 2012)

Il faut noter, qu'en raison du climat québécois, et de températures sous zéro degré Celsius pendant plusieurs mois chaque année, cette solution ne peut pas être utilisée l'hiver. En effet, des températures trop basses entraîneraient le gel de l'eau dans les buses et les conduites puisqu'elles ne fonctionnent pas de façon continue, comme le procédé de l'usine. Cela empêche non seulement l'utilisation d'eau lorsque le système est bloqué par la glace, mais peut aussi entraîner des bris dans le réseau de pompage, aux conduites et aux buses.

4.7.1 Efficacité

Il n'y a pas de règles fixes pour la conception d'un système de jets d'eau pour le contrôle de la poussière, c'est plutôt du cas par cas fait par un professionnel d'expérience. Il y a une multitude de facteurs qui peuvent influencer l'efficacité. De point de vue du design, la grosseur des gouttelettes, la répartition du jet, la pression du système, le débit d'eau et la position des jets sont tous des facteurs importants. De plus, comme l'eau s'évapore, plusieurs points d'application sont nécessaires pour assurer un contrôle de la poussière sur l'ensemble d'un réseau de convoyeurs. La distance entre chacun de ceux-ci, de même que la température influence aussi l'efficacité de la solution. (United States. Department of Health and Human Services, 2012)

Dans la littérature sur le sujet, l'efficacité n'est pas chiffrée. Mais il semble y avoir un consensus qu'il s'agit d'une solution efficace. (United States. Department of Health and Human Services, 2012; Mody et Jakhete, 1987). On peut donc estimer l'efficacité entre 70 % et 95 %. Par contre, il est souligné que la maintenance est essentielle à l'efficacité des jets d'eau et qu'un manquement à ce niveau pourrait rendre les jets d'eau inutiles. C'est un facteur qui est tenu en compte dans la section 4.6.4 sur la maintenance. (United States. Department of Health and Human Services, 2012) L'efficacité est donc catégorisée entre moyenne et élevée.

4.7.2 Maturité

Après les systèmes de dépoussiérage centraux, l'utilisation de jets d'eau pour le contrôle de la poussière est sans doute la solution la plus répandue (United States. Department of Health and Human Services, 2012). Il existe plusieurs entreprises spécialisées dans ce domaine qui comptent des spécialistes pour la conception de systèmes adaptés aux applications. Graymont a déjà utilisé l'eau comme moyen de contrôle de la poussière dans certaines usines avec succès. La maturité de la solution peut donc être évaluée élevée.

4.7.3 Coût

Il est complexe d'évaluer, sans faire appel à un professionnel du contrôle de la poussière par jets d'eau, l'ensemble de l'équipement qui serait nécessaire. Il est certain, comme mentionné plus haut, que plusieurs points d'application d'eau seraient nécessaires considérant l'ampleur du réseau de convoyeurs et le nombre important de points de transfert. En analysant la configuration du réseau de convoyeurs et les points d'émission principaux, il est possible d'estimer le nombre de secteurs d'application (qui peuvent être constitués de quelques points d'application très rapprochés) à 8. Ce nombre n'est toutefois pas gage d'une efficacité suffisante puisque ce ne serait pas tous les points de transfert qui seraient équipés de buses et de jets d'eau, mais seulement les plus importants. De plus, le prix varie beaucoup selon la distance de la source d'eau puisque cela fait varier la longueur des conduits nécessaire et la puissance des pompes. Un estimé très approximatif a été obtenu à l'aide d'une soumission demandée pour un point d'application et de prévisions budgétaires pour un projet semblable avec un seul point d'application et en ajoutant le prix approximatif d'un système de filtration de l'eau provenant de l'historique d'achat de Graymont.

Les coûts récurrents comprennent le coût de l'eau et du remplacement périodique des pièces. Le volume d'eau recommandé pour le contrôle de la poussière correspond à 0,1 % du débit de pierre transporté (United States. Department of Health and Human Services, 2012). En utilisant les débits moyens pour les

points de transfert principaux et en considérant qu'ils sont en fonction 16 heures par jour toute l'année, le volume total annuel d'eau nécessaire serait entre 20 000 et 35 000 m³. Cela représente un coût annuel de moins de 100 \$, cette dépense est donc considérée comme négligeable. (*Règlement sur la redevance exigible pour l'utilisation de l'eau*)

Comme l'eau disponible à l'usine est de source naturelle et qu'elle risque, en raison de son environnement, de contenir une concentration importante en carbonate, la fréquence de remplacement des buses risque d'être assez élevée. 5 % du coût initial est donc réservé annuellement pour les changements de pièces, particulièrement les buses.

L'énergie nécessaire au pompage de l'eau doit également être considérée. Connaissant les détails du réseau d'eau, la dimension du système de pompage pourrait être calculée et sa demande énergétique connue. En effet, contrairement à un système de ventilation qui permet à de l'air de circuler, un réseau de pompage d'un liquide comme l'eau est plus fonction de la forme de son réseau et des restrictions qu'il comprend pour sa demande énergétique parce que le fluide est plus dense. Ces informations ne peuvent être connues au stade actuel du projet. Pour avoir une idée de l'ordre de grandeur des coûts énergétiques de cette solution, la puissance de la pompe proposée pour un point d'application dans la soumission obtenue a été utilisée. Cette puissance multipliée par le coût de l'électricité de l'usine a été utilisée comme coût récurrent.

Le coût actualisé de cette solution est dans l'intervalle de coût moyen. Il faut néanmoins rappeler que les estimations effectuées pour arriver à ce résultat comprennent une grande incertitude. Il ne serait pas surprenant qu'une estimation budgétaire faite à l'aide de calculs d'ingénierie et de soumissions complètes donne un coût dans les intervalles supérieur ou inférieur.

4.7.4 Impact sur les opérations et la maintenance

Le système de jet d'eau peut facilement être automatisé pour être en fonction lorsque de la pierre est transportée sur le convoyeur qu'il alimente et s'arrêter lorsque ce n'est pas le cas et qu'il n'est plus nécessaire. Des délais peuvent également être programmés pour que les jets d'eau à action corrective continuent de fonctionner quelques secondes à quelques minutes après l'arrêt du débit de pierre, de façon à ce que le nuage de poussière émis soit complètement abattu. L'opération est donc très simple et ne nécessite qu'un minimum de temps.

La maintenance est quant à elle critique pour ce type de système. En effet, il y a de multiples sources de dysfonction du système dans l'environnement de l'usine. D'abord, il peut y avoir accumulation de carbonate ou d'autres résidus dans les conduits et les buses à cause de leur présence dans l'eau. Les poussières contenues dans l'air extérieur peuvent également colmater les buses par l'extérieur. Il peut y avoir corrosion ou érosion du système. Puis, il peut y avoir des chocs physiques sur les buses ou les conduits, que ce soit par une pierre du convoyeur lors d'un entretien sur un autre équipement ou dans d'autres situations. (United states. Department of Health and Human Services, 2012)

Or le fonctionnement adéquat du système de pompage, du réseau d'alimentation et des buses influence directement l'efficacité du contrôle de la poussière. Il y a une grande variabilité en fonction des applications, mais ce type de système peut parfois demander de l'entretien quotidiennement. (United states. Department of Health and Human Services, 2012) L'impact global sur les opérations et la maintenance est donc négatif élevé.

4.7.5 Impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité

Les seuls impacts sur l'environnement de cette solution sont la consommation d'eau et d'énergie. Le volume total d'eau utilisée quotidiennement correspond environ à 50 m³. Ce volume correspond aux deux tiers du volume à partir duquel il est nécessaire de payer pour les prélèvements d'eau selon le *règlement sur la redevance exigible pour l'utilisation de l'eau*, soit 75 m³. On peut donc considérer qu'il s'agit d'un grand volume d'eau prélevé. La consommation d'énergie est assez faible et provient presque en totalité de l'hydroélectricité. Elle n'a donc pas d'effet notable localement sur l'environnement. L'impact global sur l'environnement est donc négatif et moyen en raison de la consommation de ressource et d'énergie renouvelables.

Les nouveaux équipements nécessaires à l'implantation de cette solution ne présentent pas de danger particulier pour les opérateurs et les autres employés. L'impact sur la santé et la sécurité est donc nul.

4.8 Les diffuseurs circulaires à eau

Cette solution est là même que celle décrite à la section 4.6, mais appliquée à un point de transfert entre un convoyeur-empileur et un empilement. Il existe des systèmes de buses faits spécialement pour ce type d'application. La figure 4.6 en montre un exemple. Il s'agit d'un conduit circulaire sur lequel sont apposées plusieurs buses et qui s'installe directement sous la tête d'un convoyeur-empileur. Celles-ci créent un

rideau d'eau circulaire qui entoure la chute de matériel et qui empêche la poussière de s'échapper de son enceinte. (DustBoss, s. d.)

Évidemment, cette solution ne peut pas être utilisée en hiver pour les mêmes raisons que les jets d'eau typiques.

4.8.1 Efficacité

L'efficacité de ce type d'appareil n'est pas publiée. On peut supposer qu'elle est semblable à celle des jets d'eau pour les points de transfert entre convoyeurs, c'est-à-dire entre moyenne et élevée.



Figure 4.6 : Diffuseur circulaire à eau pour tête de convoyeur-empileur (DustBoss, s. d.)

4.8.2 Maturité

Ce type spécifique de jet d'eau n'est pas très répandu et n'a jamais été utilisé chez Graymont. La maturité de la solution est donc faible.

4.8.3 Coût

Le coût de cette solution est sensiblement le même que le coût d'un point d'application de jets d'eau typique. Il y a un coût additionnel en raison de l'anneau de buses, dont le coût est sensiblement plus élevé que celui de buses typiques. Donc on estime que les coûts initiaux par point d'application sont environ 10 % plus élevés. Le coût actualisé correspond à l'intervalle très élevé.

4.8.4 Impact sur les opérations et la maintenance

Comme pour les jets d'eau typiques, il y a un impact très faible sur les opérations et un impact important sur la maintenance. L'impact sur la maintenance est d'autant plus élevé que les buses situées à la tête d'un convoyeur-empileur ne sont pas facilement accessibles pour inspection ou entretien. L'impact global est donc élevé.

4.8.5 Impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité

L'impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité est le même que pour les jets d'eau typiques donc respectivement négatif moyen et nul.

4.9 Goulottes télescopiques

Les goulottes télescopiques s'installent à la tête d'un convoyeur-empileur. Il s'agit d'une trompe motorisée à hauteur réglable. Le matériel transporté par convoyeur tombe à l'intérieur de la goulotte. La poussière est donc contenue jusqu'à ce que le matériau touche le sol ou l'empilement. La hauteur ajustable permet à la goulotte de suivre la hauteur de la pile, pour une efficacité optimale.

Il existe plusieurs types de goulottes télescopiques. Le modèle le plus simple consiste en une série de cônes rattachés les uns aux autres par des câbles flexibles. Lorsque la goulotte remonte, les cônes s'emboîtent les uns dans les autres. La chute du matériel crée normalement une succion qui entraîne l'air à l'intérieur de la goulotte. C'est pourquoi la poussière ne sort pas entre les cônes pendant l'écoulement de la matière. Par contre, au démarrage et lors de l'arrêt de l'écoulement de pierre, de la poussière pourrait être émise. (Superchute®, 2013)

Le modèle intermédiaire est identique au précédent, mais est recouvert d'un conduit ou d'un matériau extensible. Celui-ci à l'avantage de ne pas avoir d'interstices entre ses parties, il n'y a donc aucune possibilité d'échappement de la poussière.

Le modèle le plus performant est la goulotte avec dépoussiérage intégré. Elle est formée de cônes recouverts et est entourée d'une seconde paroi extensible. L'espace entre les deux parois est dépoussiéré. La poussière qui pourrait s'échapper au bas de la chute lors du dépôt du matériel au sol est alors captée.

Ces trois types de goulottes télescopiques sont illustrés de gauche à droite à la figure 4.7. Le bas des goulottes est souvent muni d'un rideau, comme dans l'image centrale de figure.



Figure 4.7 : Goulottes télescopiques (Superchutes®, s. d.; Thenex®, 2015; Tracs, s. d.)

4.9.1 Efficacité

Des goulottes télescopiques avec dépoussiérage sont déjà utilisées par Graymont dans plusieurs usines, notamment aux postes de chargement de chaux. Plutôt que de laisser tomber la matière sur une pile, elle est déposée dans un camion. L'efficacité de ces goulottes est excellente lorsque le dépoussiérage est adéquat et que la goulotte est ajustée à la bonne hauteur. Pour un empilement, le bas de la goulotte est plus exposé au vent et aux conditions extérieures. L'efficacité devrait être un peu moindre, soit entre 90 % et 100 %. (Loyer, 2014) Il faut noter que les goulottes de ce type peuvent avoir une unité de dépoussiérage intégrée. Dans ce cas, le poids peut être problématique. Elles peuvent aussi être utilisées lorsqu'un réseau de dépoussiérage ou une unité autonome de dépoussiérage sont disponibles à proximité.

L'efficacité des deux autres types de goulottes est plus difficile à évaluer, mais il va de soi qu'elles sont moins efficaces que les goulottes avec dépoussiérage. Elles permettent tout de même d'enfermer la poussière et de protéger la pierre du vent et des intempéries qui créent des nuages de poussière. On peut estimer leur efficacité entre 65 % et 100 %

4.9.2 Maturité

Les goulottes télescopiques sont assez répandues, elles sont d'ailleurs fréquemment utilisées chez Graymont, particulièrement au chargement. Cette technologie a fait ses preuves. Par contre, l'efficacité des goulottes sans dépoussiérage reste à confirmer. La maturité est tout de même élevée.

4.9.3 Coût

Le coût des goulottes télescopiques a fait l'objet de demandes de soumissions. De plus, Graymont a un historique d'achat de ce type d'équipement. Pour ce qui est des coûts récurrents, il n'y a que la consommation d'électricité pour actionner la montée et la descente des goulottes et pour le ventilateur de l'unité de dépoussiérage. . Le coût actualisé pour les goulottes avec dépoussiérage intégré est donc dans l'intervalle de coût élevé, tandis que celui pour les autres types de goulottes est dans l'intervalle de coût faible.

4.9.4 Impact sur les opérations et la maintenance

Les goulottes constituent de nouveaux équipements mobiles dont les opérateurs doivent s'occuper. Bien que la hauteur des goulottes puisse être automatisée à l'aide de sondes qui détectent la hauteur des piles, celles-ci doivent quand même être relevées lors du déplacement angulaire des convoyeurs-empileurs et abaissées avant le début du déchargement. Ces mouvements peuvent néanmoins être automatisés.

Les goulottes constituent également de nouveaux équipements à entretenir. Contrairement aux systèmes de dépoussiérage et aux buses d'eau, les goulottes ne demandent pas d'attention particulière.

Les goulottes demandent donc un très faible temps additionnel pour l'opération et la maintenance, mais les actions requises sont plus exigeantes que des interventions ponctuelles. L'impact est donc moyen.

4.9.5 Impact sur l'environnement et sur la santé et la sécurité

Le seul impact sur l'environnement provient de la consommation d'énergie qui est négligeable. Les goulottes ne sont pas source de dangers supplémentaires pour les opérateurs et les autres employés, notamment parce qu'elles sont situées à la tête des convoyeurs-empileurs et donc difficiles d'accès. L'impact sur la santé et la sécurité est donc nul.

5 SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Ce chapitre a comme objectifs de synthétiser les résultats de l'analyse des options et de sélectionner l'option ou la combinaison d'options optimale. La section 5.1 présente un tableau synthèse de l'analyse. Puis, les sections 5.2 et 5.3 clôturent cet essai avec les recommandations finales.

5.2 Synthèse de l'analyse

Le tableau 5.1 présenté à la page suivante récapitule les résultats de l'analyse pour chacune des solutions étudiées et de leurs variantes. Chaque critère comprend une évaluation selon la méthodologie expliquée au chapitre 3. Pour faciliter la visualisation des résultats, des couleurs ont été ajoutées, leur signification est expliquée dans la légende sous le tableau 5.1.

Le tableau 5.1 montre que deux solutions ont un coût inacceptable, soit l'utilisation de convoyeurs étanches doubles et l'utilisation d'abat-poussières chimiques. Leur coût total actualisé respectif dépasse 150 000 \$ par point de transfert, ces deux solutions sont trop chères pour être envisageables. Elles sont donc éliminées.

5.2.1 Points de transfert entre convoyeurs

Pour les points de transfert entre convoyeurs, toutes les solutions dont le coût est acceptable et dont l'efficacité élevée ont un coût total élevé. Ce sont donc les autres critères qui différencient les solutions.

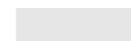
La solution qui a la meilleure performance globale est l'utilisation de convoyeurs étanches simples sur toute la longueur des convoyeurs. L'efficacité est élevée et c'est la seule solution qui n'a aucun impact négatif sur les opérations, la maintenance et l'environnement en plus d'avoir un impact positif sur la santé et la sécurité. Il est intéressant de constater que si l'efficacité est aussi suffisante avec une couverture partielle des convoyeurs, que ce soit sur dix mètres ou trois mètres, cette solution peut avoir un coût bien inférieur aux autres solutions. Elle obtient donc la première position au classement.

La seconde solution la plus avantageuse est le dépoussiérage central avec receveurs antifuite. Celle-ci permet une efficacité élevée. Néanmoins, elle amène plus d'impacts sur les opérations et la maintenance puisqu'il s'agit d'un équipement actif, en opposition avec les convoyeurs étanches qui sont passifs. C'est d'autant plus le cas considérant que l'efficacité des systèmes de dépoussiérage central a tendance à

Tableau 5.1 : Synthèse de l'analyse des options

Critère\solution	Points de transfert entre convoyeurs									Point de transfert vers empilement		
	Dépoussiérage central	Dépoussiérage central avec variante receveur antifuite	Dépoussiérage par unités autonomes	Convoyeurs étanches doubles	Convoyeurs étanches simples (couverture complète)	Convoyeurs étanches simple 10m	Convoyeurs étanches simple 3m	Abat-poussières chimiques	Jets d'eau	Diffuseur circulaire à eau	Goulottes télescopiques avec dépoussiérage	Goulottes télescopiques simples
Efficacité	Moyenne (diminue avec le temps)	Élevée (diminue avec le temps)	Élevée	Élevée	Élevée	À confirmer	À confirmer	Moyenne	Moyenne à élevée (été)	Moyenne à élevée (été)	Élevée	Faible à moyenne
Maturité	Élevée	Élevée	Moyenne	Élevée	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Élevée	Faible	Élevée	Élevée
Coût	Élevé	Élevé	Élevé	Inacceptable	Élevé	Faible	Très faible	Inacceptable	Moyen	Très élevé	Élevé	Faible
Impact sur les opérations et la maintenance	Négatif moyen	Négatif moyen	Négatif élevé	Négatif moyen	Nul	Nul	Nul	Négatif faible	Négatif moyen à élevé	Négatif élevé	Négatif moyen	Négatif moyen
Impact sur l'environnement et la santé et la sécurité	Négatif moyen	Négatif moyen	Négatif moyen	Négatif moyen	Positif (SST)	Positif (SST)	Positif (SST)	Négatif moyen	Négatif moyen	Négatif faible	Nul	Nul
Classement	-	2	3	X	1			X	4	3	1	2

Légende :

 Information manquante ou qui doit être confirmée

 De vert à rouge la performance varie d'excellente à très faible.

 Performance inacceptable, la solution est éliminée.

diminuer avec le temps et qu'une maintenance préventive et un suivi serré sont nécessaires pour minimiser cet effet. L'impact sur l'environnement et la santé et la sécurité est lui aussi plus important. Cette solution se classe donc en deuxième position.

Compte tenu de la très faible augmentation de coût engendré par les receveurs antifuite à la solution de dépoussiérage central, l'option sans receveur est mise de côté. En effet, ceux-ci permettent de maximiser l'efficacité à faible coût.

L'option de dépoussiérage par unités autonomes se classe au troisième rang. Malgré une efficacité aussi élevée qu'un dépoussiéreur central et une plus grande certitude sur la pérennité de cette efficacité, cette solution comporte trop d'inconvénients. C'est surtout pour les opérations et la maintenance que cette solution est désavantageuse puisque le nombre d'équipements à la charge des employés est grand et que ceux-ci sont répartis à plusieurs endroits sur le site. L'engagement des employés n'est donc pas assuré avec cette solution. Elle tombe donc en troisième position.

La solution des jets d'eau termine en dernière position. La raison principale est qu'elle n'est utilisable qu'en dehors des périodes de gel, ce qui en fait une solution saisonnière seulement alors que le contrôle de la poussière est nécessaire toute l'année. Elle a aussi une moins bonne efficacité et un coût potentiellement plus élevé que les autres solutions.

5.2.2 Point de transfert vers empilement

La goulotte télescopique avec dépoussiérage est la seule solution ayant une efficacité élevée. Par contre, son coût est plus élevé que celui de la goulotte simple. Elle a donc été classée en première position, mais cette position pourrait changer en faveur de la goulotte simple si le coût est critique lors du choix final de la solution. La goulotte simple tombe donc en deuxième position.

Pour ce qui est du diffuseur circulaire à eau, il est classé en troisième et dernière position. En plus de ne pouvoir être utilisé qu'en été, cette solution a des désavantages notables pour ce qui est de la maturité et de l'impact sur les opérations et la maintenance. Même si elle était utilisable toute l'année, elle conserverait sa position, puisque les goulottes correspondent mieux aux besoins identifiés.

5.3 Recommandations principales

Comme démontré dans la section 5.1, la solution optimale consiste à utiliser des convoyeurs étanches simples. La première recommandation est donc de tester quelle longueur de convoyeurs étanches est

nécessaire pour obtenir l'efficacité souhaitée. Pour ce faire, il suffit d'en installer le minimum à un point de transfert, et de rajouter des unités d'un mètre une par une jusqu'à ce que l'efficacité souhaitée soit atteinte. Cela permettra de réduire au minimum le coût de la solution la plus avantageuse. Le résultat de ce test donnera une idée de la longueur nécessaire pour les autres points de transfert.

Des convoyeurs étanches peuvent ensuite être installés à chaque point de transfert en prenant soin d'ajuster la longueur en fonction des besoins spécifiques du point d'émission. En effet, certains convoyeurs, en raison de leur vitesse, du type de pierre y étant transporté, etc. peuvent demander des longueurs différentes.

Pour ralentir la vitesse de l'air dans les convoyeurs étanches, il est recommandé d'installer des rideaux à frange entre chaque section d'un mètre. Cela créera une restriction qui permettra à une partie de la poussière de se déposer plus rapidement. Pour minimiser la sortie de poussière au bout de la longueur nécessaire de convoyeurs étanches, des couvercles métalliques typiques devraient être installés tout au long de la partie non étanche du convoyeur (utiliser ceux qui sont déjà présents si c'est le cas). Il faudrait également s'assurer que le premier couvercle en question ne limite pas l'ouverture latérale des rives du dernier segment de convoyeur étanche sans toutefois laisser d'interstice entre les deux.

Il est également crucial de munir chacun des points de transfert d'une chute de tête étanche lorsque la poussière a tendance à remonter vers le haut du point de transfert, quitte à installer une unité de convoyeur étanche avant la chute en tête de convoyeur si c'est nécessaire.

Comme il n'est pas possible d'installer de convoyeurs étanches simples sur les convoyeurs-empileurs, l'approche recommandée consiste à installer des unités de dépoussiérage autonome en queue de ceux-ci. La raison principale qui excluait cette option comme solution globale était que la multiplication du nombre d'équipements est problématique pour les opérations et la maintenance. En installant seulement un nombre très limité de ces unités autonomes pour les convoyeurs-empileurs, ce problème est grandement réduit. Il s'agit donc d'une excellente alternative pour des points de transfert peu nombreux.

Les goulottes télescopiques avec dépoussiérage sont à préconiser pour les points de transfert de convoyeurs-empileurs vers les empilements. Il s'agit en effet de la solution la plus efficace, ce qui implique un coût plus élevé que les autres options. Une façon de diminuer le prix serait d'utiliser l'unité autonome de dépoussiérage, proposée au paragraphe précédent et qui se trouve en queue de convoyeur, comme source d'aspiration. En effet, celle-ci pourrait être reliée à la tête du convoyeur-empileur par un conduit, avec une jonction flexible pour permettre le mouvement rotatif. Cette option n'a pas été analysée en

détail, mais pourrait être avantageuse et devrait donc être étudiée sérieusement avant de prendre une décision définitive sur les équipements de contrôle de la poussière utilisés.

Si le coût est un enjeu contraignant, les goulottes télescopiques sans dépoussiérage pourraient être envisagées. Il est certain qu'elles auront une efficacité moindre que les goulottes dépoussiérées, mais elles pourraient être suffisantes, surtout pour les points de transfert peu poussiéreux.

5.4 Autres recommandations

Les convoyeurs étanches doubles et les abat-poussières sont à éviter puisque leur coût est beaucoup trop élevé. Les convoyeurs étanches doubles pourraient être considérés seulement dans le cas de nouvelles installations. Il faudrait comparer les coûts d'achat et d'installation d'un convoyeur additionné du coût d'un système de contrôle de la poussière comme les convoyeurs étanches simples pour vérifier si le surcoût est plus acceptable. En effet, cette solution demeure intéressante puisque c'est la seule qui étanche aussi la courroie de retour du convoyeur, et qui empêche donc la production de poussière par le frottement des rouleaux de retour. Les abat-poussières ne devraient être considérés que si un produit à bas prix est trouvé et si l'efficacité est prouvée pour plusieurs points de transfert consécutifs.

L'utilisation de jets d'eau est aussi à proscrire, sauf dans le cas où il s'agirait d'une application temporaire ou saisonnière. Il est possible que les jets d'eau soient alors avantageux au niveau du prix, d'autant plus qu'il est possible de louer une partie des équipements nécessaires.

Lorsque des secteurs sont déjà équipés d'un système de dépoussiérage central et que celui-ci est déficient, il n'est pas recommandé de démanteler le système existant pour le remplacer par des convoyeurs étanches. Il s'agirait plutôt de commencer par une vérification en profondeur du dépoussiéreur et du réseau de ventilation, suivi des réparations, ajustements et équilibrage nécessaires. Ensuite, les points de transfert peuvent être étanchés au maximum, soit avec des receveurs antifuite, ou même avec des unités de convoyeurs étanches. Pour assurer une efficacité durable du système, un suivi serré et une maintenance préventive efficace devraient être prévus, sans quoi l'efficacité risque de diminuer de nouveau.

CONCLUSION

La poussière est un polluant commun produit par de multiples sources, dont l'industrie. La manutention de la pierre est une opération fréquente qui produit de la poussière, mais ces émissions peuvent être contrôlées. Le contrôle de la poussière est nécessaire parce que son émission entraîne des impacts importants sur les plans environnemental, social et économique. Les émissions de poussières sont d'ailleurs assujetties à des limites d'émission et à des normes au Canada et au Québec.

L'objectif de cet essai était de sélectionner une solution optimale pour contrôler la poussière émise par la manutention de la pierre à l'usine de chaux de Graymont située à Marbleton. La manutention de la pierre se fait par convoyeurs à courroie et les points de transfert entre convoyeurs et vers les empilements sont les principales sources de poussière.

Une recherche exhaustive a été effectuée pour répertorier l'ensemble des solutions envisageables. Puis chaque solution techniquement faisable a été évaluée sous des critères prédéfinis par un groupe de travail de l'usine. Ces critères sont le coût, la maturité de la solution, l'efficacité, l'impact sur les opérations et la maintenance et l'impact sur l'environnement et la santé et la sécurité.

Plusieurs solutions ont pu être éliminées en raison de leur coût trop élevé. La solution la plus prometteuse est l'utilisation de convoyeurs étanches aux points de transfert entre convoyeurs pour contenir la poussière lorsqu'elle est émise et la laisser retomber sur la courroie. La longueur nécessaire pour limiter suffisamment les émissions est néanmoins inconnue et a une grande influence sur le coût de la solution. L'avantage flagrant de cette solution est que les équipements mis en place sont passifs, ce qui fait que les coûts récurrents, de même que les opérations et la maintenance nécessaires à leur bon fonctionnement sont minimales. C'est également la seule solution qui a un impact positif sur la santé et la sécurité et aucun impact négatif sur l'environnement. Pour les points de transfert vers les empilements, la solution retenue est l'utilisation de goulottes télescopiques dépoussiérées.

L'approche recommandée est donc d'entreprendre un essai pilote des convoyeurs étanches pour vérifier la longueur nécessaire au confinement de la poussière. Suite à ce test, le coût réel sera connu et la solution pourra être étendue à l'ensemble de l'usine.

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Anonyme (2014). Technologies de contrôle de la poussière. Communication orale. Visite d'usine sur le sujet de la poussière par Pascale Fortin-Richard et François Moreau avec *Anonyme, Responsable maintenance et fiabilité*, 10 octobre 2014, usine de Joliette, Holcim.
- American Chain Association (2006). Standard handbook of chains; chains for power transmission and material handling. 2^e edition, Boca Raton, CRC Press, 432 p.
- Boulay, S. (2015). Taux d'actualisation pour les estimés budgétaires de projets. Communication orale. *Entrevue menée par Pascale Fortin-Richard avec Steve Boulay, contrôleur des opérations (finances)*, Graymont, Boucherville, 7 janvier 2015.
- Brunone Innovation (2012). Sparga. In Brunone Innovation. *Sparga le receveur anti-fuite*. http://www.brunone.fr/la-gamme-de-produits/product/11-sparga-le-receveur-anti-fuites/category_pathway-14.html (Page consultée le 11 mars 2015).
- Brunone Innovation (s. d.). Transpar Ex. In Brunone Innovation. *Transpar Ex – Confinement des poussières*. <http://www.brunone.fr/produits-r-brunone-traon/product/17-transpar-ex-confinement-des-poussières.html> (Page consultée le 11 mars 2015)
- Bureau de normalisation du Québec (BNQ) (2009). *Produits utilisés comme abat-poussières pour routes non asphaltées et autres surfaces similaires*. Québec, BNQ, 24 p. (BNQ 2410-300)
- Campanac, R., Allombert, J., Delobelle, T. (2000). Dedusting. In Primel, L. et Tourenq, C., *Aggregates* (chapitre 13). Rotterdam, A.A. Balkema.
- Canada. Environnement Canada (2013a). Particules. In Environnement Canada. *Principaux polluants atmosphériques et polluants connexes*. <http://www.ec.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=56D4043B-1&news=A4B2C28A-2DFB-4BF4-8777-ADF29B4360BD> (Page consultée le 12 Décembre 2014)
- Canada. Environnement Canada (2013b). Normes nationales de qualité de l'air ambiant. In Environnement Canada. *Fiches d'information archivées*. <http://www.ec.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=56D4043B-1&news=A4B2C28A-2DFB-4BF4-8777-ADF29B4360BD> (Page consultée le 20 janvier 2015)
- Canada. Environnement Canada (2014). Règlement multisectoriel sur les polluants atmosphériques. In Environnement Canada. *Registre environnemental de la LCPE*. <http://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/fra/reglements/detailReg.cfm?intReg=220> (Page consultée le 18 janvier 2015)
- CCME (2014). SGQA. In CCME. Ressources. http://www.ccme.ca/fr/resources/air/aqms.html#fr_anchor4 (Page consultée le 23 janvier 2015)
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST) (2015a). Comment les matières particulaires passent-elles dans l'appareil respiratoire?. In CCHST. *Propriétés et substances chimiques*. http://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/how_do.html (Page consultée le 3 mai 2015).
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST) (2015b). Quels sont les effets de la poussière sur les poumons?. In CCHST. *Propriétés et substances chimiques*. http://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/lungs_dust.html (Page consultée le 3 mai 2015).
- Chemical Engineering (2014). *Economic Indicators*. Chemical Engineering, vol. 121, N^o. 3, p.71-72.

- Chevalier, P. (1996). *Technologies d'assainissement et de prévention de la pollution*. Québec, Télé-université Université du Québec à Montréal, 440 p.
- ChinA-ogpe.com (2015). Scraper conveyor. In chinA-ogpe.com. Other Conveying & Weighing Equipment. http://www.china-ogpe.com/showroom/1037/html/product_Scraper_conveyor_6_13058.html (Page consultée le 3 avril 2015)
- Ciment du Saint-Laurent Inc. c. Barrette*, 2008 CSC 64.
- Code civil du Québec*, R.L.R.Q. 1991, C.c.Q.-1991.
- Cooper, C.D., Alley, F.C. (2011). *Air Pollution Control: a design approach*. 4^e edition, Long Grove, Waveland Press inc., 839 p.
- Couture, O (2014). Efficacité et maintenance des convoyeurs étanches. Communication orale. *Entrevue téléphonique menée par Pascale Fortin-Richard avec Olivier Couture, planificateur à l'entretien, Graymont, usine de Bedford*, 27 novembre 2014.
- Descôteaux, M. (2012). *Diminuer les émissions de poussières d'un site d'extraction et de traitement de pierre calcaire*. Essai de Maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 91 p.
- Dostie, R., Houde, K., Morissette, Y. Renaud, A. (2014). Réunion au sujet des critères d'analyse des solutions de contrôle de la poussière. Communication orale. *Réunion menée par Pascale Fortin-Richard avec Richard Dostie, directeur d'usine, Keven Houde, coordonnateur en environnement et Yves Morissette, spécialiste en environnement, santé et sécurité*, 22 juillet 2014, Salle de conférence du bureau principal de l'usine Graymont à Marbleton.
- DSH Systems Ltd. (2015). The DSH Difference. In DSH Systems Ltd. http://www.dshsystems.com/english/the_dsh_difference/index.htm (Page consultée le 3 avril 2015).
- DustBoss (s. d.) DB-R. In DustBoss. Products. <http://www.dustboss.com/products/db-r/>
- European Union. European Environment Agency (2014). Costs of air pollution from European industrial facilities 2008–2012 — an updated assessment. In Publications. *European environment Agency*. <http://www.eea.europa.eu/publications/costs-of-air-pollution-2008-2012> (Page consultée le 3 mai 2015)
- European Union. AEE (s. d.). Living in the EU. In European Union. *How the WU works*. http://europa.eu/about-eu/facts-figures/living/index_en.htm (Page consultée le 12 décembre 2014).
- France air (2012). Guide_industrie_titaniuml_C_autonome. In France air. *Catalogue*. <http://espacepro.france-air.com/titanium-c2-autonome-depoussiereur-a-cartouches#documents>
- Gravelle, F. (2015). Méthodes de contrôle de la poussière. Communication orale. *Entrevue menées par Pascale Fortin-Richard avec François Gravelle, opérateur chez Graymont*, 5 mars 2015, usine de Marbleton, Graymont.
- Greystone Inc. (2015). GreyStone custom-designs standard- and heavy-duty portable conveyors, radial stackers, tower radial stackers and overland conveyors for all material handling applications. In *Aggregates and Mining Today. GreyStone Conveyor Systems Reduce Trucking Costs With Capacities Up To 3,700 TPH*.

- Hamel, S. (2014). Options de contrôle de la poussière au chargement. Communication orale. *Entrevue téléphonique menée par Pascale Fortin-Richard avec Stéphane Hamel, superviseur de production, Graymont, usine de Bedford*, 17 novembre 2014.
- Houde, K. (2014). Sources de poussière et équipement de contrôle. Communication orale. Visite d'usine sur le sujet de la poussière par Pascale Fortin-Richard avec Keven Houde, coordonnateur en environnement à l'usine de Marbleton, 1^{er} juillet 2014, usine de Marbleton, Graymont.
- Greystone (s. d.). GreyStone custom-designs standard- and heavy-duty portable conveyors, radial stackers, tower radial stackers and overland conveyors for all material handling applications. In *Aggregates and Mining Today. GreyStone Conveyor Systems Reduce Trucking Costs With Capacities Up To 3,700 TPH*. <http://a.aggregatesandminingtoday.com/greystone-conveyor-systems-reduce-trucking-costs-with-capacities-up-to-3700-tph,2009-8,677,0,4,featured-product.aspx> (Page consultée le 19 janvier 2015)
- Hydro-Québec (2015). État de compte au 5 janvier 2015 (Facture d'électricité). Montréal, Hydro-Québec, 2 p.
- Institut de la statistique du Québec (2015). Recensement 2011. In Institut de la statistique du Québec. Statistiques et publications. <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/recensement/2011/index.html> (Page consultée le 12 Décembre 2014)
- Institut français de chirurgie du nez et des sinus (2015). Rhinite chronique. In Institut français de chirurgie du nez et des sinus. *Rhinite*. <http://www.institut-nez.fr/rhinite/rhinite-chronique-c50.html> (Page consultée le 3 mai 2015).
- IPAC Chemicals Ltd. (2011). Dust Suppression. In IPAC Chemicals LTD. *Products*. <http://ipachem.net/products.php?bp=2394> (Page consultée le 11 février 2015).
- King, H. (2005). Limestone. In Geology.com. Rocks. <http://geology.com/rocks/limestone.shtml> (Page consultée le 5 mai 2015).
- Levy, A. et Kalman, H. (2001). Handbook of Conveying and Handling of Particulate Solids. New York, Elsevier 860 p. (Collection Handbook of powder technology, v. 10)
- Loi sur la qualité de l'environnement*, R.L.R.Q. 2013, c. Q-2
- 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. (2014). Contrôle de la poussière au chargement. Communication orale. *Entrevue téléphonique menée par Pascale Fortin-Richard avec Jean-Pierre Loyer, Technicien de laboratoire sénior, Graymont, usine de Joliette*, 7 novembre 2014.
- Mody, V. et Jakhete, R. (1987). Dust Control Handbook for Mineral Processing. In United States Department of Labor. *A mining research contract report February 1987*. https://www.osha.gov/dsg/topics/silicacrystalline/dust/dust_control_handbook.html (Page consultée le 9 novembre 2014).
- Moreau, F. (2012). Phase1-Estimation (tableur Microsoft Excel). Joliette, Graymont, 1 p.

- Moreau, F. (2015). Convoyeurs étanches doubles. Communication orale. *Entrevue téléphonique menée par Pascale Fortin-Richard avec François Moreau, services techniques chez Graymont*, 21 janvier 2015.
- Moreau, F. (2014). Dépoussiérage. Communication orale. *Entrevue téléphonique menée par Pascale Fortin-Richard avec François Moreau, services techniques chez Graymont*, 13 octobre 2014.
- Munson B. R., Young D. F., Okiishi T. H., Huebsch W. W. (2009). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 6^e édition, Hoboken, John Wiley & sons, Inc., 725 p.
- Narayanan R. L., Lancaster B. W. (1973). Household Maintenance Costs and Particulate Air Pollution. *Clean Air*. February, p. 10–13.
- Nevada. Department of Taxation (2013). Personal Property Manual 2014-2015. *In Clark County Nevada. Business personal property*.
<http://www.clarkcountynv.gov/Depts/assessor/Pages/BusPersonalProperty.aspx> (Page consultée le 18 février 2015)
- New Zealand. Ministry for the Environment (2008). Good practice guide for assessing and managing the environmental effects of dust emissions. *In Ministry for the Environment. Air*. (Page consultée le 3 mai 2015).
- Nguyen, A. (2012). Étanchement par toile. Calgary, Graymont, 1 p.
- Nguyen, A. (2014). Contrôle de la poussière lors de la manutention de la pierre. Communication orale. *Visite d'usine par Pascale Fortin-Richard avec Alexander Nguyen, anciennement ingénieur de procédé chez Graymont*, 21 juillet 2014, usine de Exshaw, Graymont.
- OMS (2014). Exposure to Particulate Matter less than 10 µm in diameters in Urban Areas 2008-2013. *In WHO. Exposure to Ambient Air Pollution*.
http://www.who.int/gho/phe/outdoor_air_pollution/exposure/en/ (Page consultée le 9 novembre 2014)
- Ostavar, T. (31 juillet 2014). *Dust Mitigation*. Courrier électronique à Pascale Fortin-Richard, adresse destinataire : pfrichard@graymont.com.
- Ouelet, M. (2015). Méthode de contrôle de la poussière aux empilements. *Entrevue menée par Pascale Fortin-Richard avec Marc Ouelet, opérateur de chargeur chez Graymont*, 14 avril 2015, Usine de Marbleton, Graymont.
- Peters, M.S., Timmerhaus, K., West, R.E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 5^e édition, New York, McGraw-Hill, 988 p.
- Power Chemicals Ltd. (2015). Specialty Dust Suppression. *In LinkedIn. Power Chemicals LTD*.
<https://www.linkedin.com/company/dust-suppression-work> (Page consultée le 11 février 2015).
- Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2013). Consommation d'électricité. *In Énergie et Ressources naturelles Québec. Statistiques énergétiques*.
<http://www.mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-consommation-electricite.jsp> (Page consultée le 12 février 2015).
- Règlement sur la redevance exigible pour l'utilisation de l'eau*, R.L.R.Q. 2010, c. Q-2, r. 42.1
- Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère*, R.L.R.Q. 2011, c. Q-2, r. 4.1.

- Robert, P. (2008). *Le nouveau petit Robert*. Édition 2008, Paris, SEJER, 2837 p.
- Savard, T. (2014). Dépoussiérage par unités autonomes. Communication orale. *Entrevue téléphonique menée par Pascale Fortin-Richard avec Tony savard, Conseiller technique, Concept-air*, 24 novembre 2014.
- Service des bibliothèques de l'Université du Québec à Montréal (2010). Évaluer ses sources. In Infosphère. *Évaluer et citer ses sources*. http://www.bibliotheques.uqam.ca/infosphere/sciences_humaines/module7/evaluer.html (Page consultée le 15 novembre 2014)
- Sittig, M. (1977). Particulates and fine dust removal: processes and equipment. Noyes data Corp, 605 p. (Collection Pollution technology review).
- Spraying Systems Co. (2008). A Guide to Spray Technology for Dust Control. In Spraying Systems Co. *Litterature*. http://www.spray.com/literature/literature_all.aspx
- Stanam Industrie (9 décembre 2014). *Installation Liftube® aux États-Unis*. Courrier électronique à Pascale Fortin-Richard, adresse destinataire : pfrichard@graymont.com.
- Stanam Industrie (s. d.a). Liftube système qui optimise l'étanchéité et la sécurité de tout convoyeur à bande. In Stanam Industries. *Manutention continue*. http://www.standard-industrie.com/etancheite_convoyeur_a_bande_liftube.asp (Page consultée le 12 février 2015)
- Stanam Industries (s.d.b). LIFTUBE®. In Stanam Industries. *Manutention continue*. http://www.standard-industrie.com/etancheite_convoyeur_a_bande_liftube.asp (Page consultée le 12 février 2015)
- Statistique Canada (2013). Graphique 5.1 Émissions de particules totales et de monoxyde de carbone, Canada, 1985 à 2009. In Statistique Canada. *Émissions atmosphériques*. <http://www.statcan.gc.ca/pub/16-201-x/2012000/ct008-fra.htm> (Page consultée le 18 janvier 2015)
- Statistique Canada (2014). Recherche en ligne de données sur l'émission de polluants atmosphériques. In Statistique Canada. *Ensemble de données de l'INRP*. <http://www.ec.gc.ca/inrp-npri/donnees-data/ap/index.cfm> (Page consultée le 18 janvier 2015)
- Superchutes® (2013). Nesting Chutes. In Superchutes®. *No More Dust Control Problem*. <http://www.superchute.com/new/Chutes/nesting.html> (Page consultée le 4 avril 2015).
- Superchutes®, (s. d.) Telescopic Chutes. In Superchutes®. <http://www.superchute.com/enhanced/ch%20nesting%20c.htm> (Page consultée le 3 avril 2015)
- Sustainable aggregates (s. d.). Dust Impacts. In Sustainable Aggregates. *Dust*. http://www.sustainableaggregates.com/sourcesofaggregates/landbased/dust/dust_impacts.htm (Page consultée le 20 octobre 2014)
- Thenex®, (2013). Telescopic Chutes for loading bulk material. In Thenex®. *News*. <http://www.thenex.com/newsreader/items/telescopic-chute-for-loading-bulk-materials.html> (Page consultée le 3 avril 2015)
- Townsend, M. (2012). A Study in Sand Investigating the Damage Done by Desert Dust. *Lubes'N'Greases Europe – Middle East – Africa*, February 2012, p. 3-5.

- Tracs (s. d.) Motorised Telescopic Chutes. *In Tracs. Products & Services.*
http://tracs.in/motorised_telescopic_chutes.php (Page consultée le 3 avril 2015)
- Turner J. H. (1998). Particulate Matter Control. *In US EPA, EPA Air Pollution Control Cost Manual (EPA 452/B-02-001) (Section 6), 6^e édition.* Spingfield, EPA.
- United States. Department of Health and Human Services (2012). Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing. *In Centers for Disease Control and Prevention. Mining Topic: Respirable Dust.* <http://www.cdc.gov/niosh/mining/topics/RespirableDust.html> (Page consultée le 9 novembre 2014)
- United States. US EPA (2002). Potential Environmental Impacts of Dust Suppressants: “Avoiding Another Times Beach”. *In United States Environmental Protection Agency. Environmental Sciences – Characterization and Monitoring – Research Papers.*
<http://www.epa.gov/esd/cmb/research.htm> (Page consultée le 11 février 2015).
- United States. US EPA (2004). Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing. *In EPA, AP 42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 11,19,2.*
<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/index.html> (Page consultée le 9 novembre 2014)
- United States. US EPA (2013). Particulate Matter (PM). *In US EPA. Six common pollutants.*
<http://www.epa.gov/airquality/particlepollution/index.html> (Page consultée le 17 janvier 2015)

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.
- Abhishek, T., Colls, J. (2010). *Air pollution : measurement, modelling and mitigation*. 3^e édition, New-York, Routledge, 501 p.
- 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.
- Ashelin, C. (2014). Dust control. *ISHN*, vol. 48, n°9, p. 101.
- Canada. Environnement Canada (2014). Code de pratiques pour réduire les émissions fugitives de matières particulaires totales et de composés organiques volatils provenant du secteur de l'acier, du fer et de l'ilménite. In Environnement Canada. *Consultations publiques*. <http://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/default.asp?lang=Fr&n=C8DD8207-1> (Page consultée le 14 juillet 2014)
- Canada. Environnement Canada (2014). Guide pour les carrières et sablières. In Environnement Canada. *Boîte à outil de l'INRP*. <https://www.ec.gc.ca/inrp-npri/default.asp?lang=Fr&n=A9C1EE34-1> (Page consultée le 27 septembre 2014)
- CCME (2000). Canada-wide standards for Particulate Matter (PM) and ozone. In CCME. *Resources*. http://www.ccme.ca/en/resources/air/pm_ozone.html (Page consultée le 23 août 2014).
- Central Pollution Control Board Parivesh Bhawan (2009). Comprehensive Industry Document Stone crushers. In Central Pollution Control Board. http://cpcb.nic.in/upload/NewItems/NewItem_148_STONE_CRUSHER_REPORT.pdf (Page consultée le 16 octobre 2014).
- Cheng, S., Jiang, J., Fajardo, O. Wang, S., Hao, J. (2012). Characteristics and health impacts of particulate matter pollution in China (2001–2011). *Atmospheric Environment*, vol. 65, p. 186-194.
- 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.
- Cleveland Cascades (s. d.). Transfer points. In Cleveland Cascades. *Products*. http://www.clevelandcascades.co.uk/transfer_points.php (Page consultée le 16 juillet 2014).
- 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.
- Europe. European Commission (2010). Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. In European Commission. Reference documents. <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/> (Page consultée le 6 décembre 2015).
- Findeva (s. d.). Vibrateurs pneumatiques pour l'industrie. In Findeva. *Produits*. <http://www.findeva.com/fr/> (Page consultée le 1^{er} août 2014).
- Freeman, H.M. (1995). *Industrial pollution prevention handbook*. New-York, McGraw-Hill, 935 p.

- Kaufman Y.J., Koren, I., Remer, L.A., Rosenfeld, D. et Rudichs, Y. (2005). The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean. *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 102, n° 32, p. 11 207-11 212.
- Kinsey, J. (1986). Lime and Cement Industry Particulate Emissions: Source category Report I. Lime Industry. In EPA. *National Service Center for Environmental Publications (NSCEP)*.
<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/2000TJQW.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1986%20Thru%201990&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C86THRU90%5CTXT%5C0000009%5C2000TJQW.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=p%7Cf&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1> (Page consultee le 6 octobre 2014)
- Krasovitskii, Y.V., Éntin, S.V., Kabargin, S.L., Ermolychev, D.A., Kolbeshkin, B.G., Kuznetsova, M.N. Man'kov, A.A et Troshenko, D.B. (2006). Economic Aspects of dust collecting from exit gas and aspiration exhaust in refractory production. *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 47, n° 4, p. 234-236.
- Lee, M. et Walters, M. (1999). Test your dust getting dust collection right scientifically. *Ceramic Industry*, vol. 149, n°7, p.24-29.
- Lewis, C.J., Crocker, B.B. (1969). The Lime Industry's Problem of Airborne Dust. *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 19, n° 1, p. 31-39.
- 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.
- Mycock, J.C., McKenna, J.D., Theodore, L. (1995). *Handbook of Air Pollution Control Engineering and Technology*. Boca Raton, CRC Press, 416 p.
- Nel, A. (2005). Air pollution-related illness: Effects of particles. *Science*, vol. 308, n° 5723, p. 804-806.
- Nunavut. Department of Environment (2014). Environmental Guideline for Dust Suppression on Unpaved Roads. In Department of Environment. *Environmental Protection*.
<http://env.gov.nu.ca/programareas/environmentprotection> (Page consultée le 14 novembre 2014)
- 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.
- 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.
- SANDVIK (2010). Belt Turners. In SANDVIK. *Belt cleaners*.
http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/Poland/s004949.nsf/GenerateTopFrameset?ReadForm&menu=&view=http%3A//www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/Poland/S004947.nsf/AllDocs/Products*5CConveyors*and*conveyor*components*5CBelt*cleaners*2ABelt*turners&banner=/sandvik/0120/Internet/Poland/s004949.nsf/LookupAdm/BannerForm%3FOpenDocument. (Page consultée le 23 juillet 2015)

- Schonbach, B.E. (s. d). Operational options for dust control. *In* BHS technical. *Technical papers*.
<http://bhstechnical.com/techpapers/OpOptionsDustCtrl-BHS.pdf> (Page consultée le 7 juillet 2014).
- SLY Ltd. (1998). Maintenance Checklist for a Better Baghouse. *In* SLY Ltd. *Clean Environment Technology. Dust Collector Maintenance*. <http://slyfilters.com/dust-collector/maintenance.html> (Page consultée le 7 janvier 2015)
- Société de l'industrie minérale (2008). *Guide de l'exploitant : empoussiérage, dépoussiérage*. Mines & Carrières, vol. Hors-Série 3, n° 152, p. 1-96.
- Unites States. US EPA (s.d.) Dust control. *In* US EPA. *Best Management Practices*.
<http://water.epa.gov/polwaste/npdes/swbmp/Dust-Control.cfm> (Page consultée le 28 avril 2014).
- World business council for sustainable development (2012). Guidelines for Emissions Monitoring and Reporting in the Cement Industry. *In* Cement sustainability initiative. *Publications*.
<http://www.wbcdcement.org/index.php/en/publications> (Page consultée le 9 février 2015).