

Programme de Génie Civil
CIV 4109

ÉMISSIONS DE GES
ATTRIBUABLES AU BÉTON DE CONSTRUCTION :
ÉTUDE COMPARATIVE DES
PAVILLONS PRINCIPAL ET LASSONDE

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

Présenté à
Louise Millette
Erik Bélanger

Par
Nicolas Pitre 1252078



École Polytechnique de Montréal
Mardi, le 17 avril 2007

Sommaire

Étant donné la popularité de l'environnement depuis un certain temps, le domaine de la construction a dû s'adapter et mettre sur le marché des techniques ayant des répercussions négatives moins importantes sur l'environnement. Depuis quelques années, les producteurs de béton se penchent sur la question et ils ont su faire beaucoup de progrès. En association avec l'industrie cimentière, on tend à diminuer la quantité de ciment Portland dans les mélanges pour le remplacer par des ajouts cimentaires qui améliorent les caractéristiques du béton, en plus d'avoir des effets bénéfiques sur le milieu. La construction des pavillons Lassonde suit cet optique et l'école a même décidé de s'inscrire au programme LEED sur les bâtiments verts afin d'assurer un suivi constant lors du projet. De là est venu l'idée de comparer le nouveau bâtiment avec l'ancien. Il est alors intéressant de constater à quel point le béton ternaire génère moins de GES. L'analyse des matériaux des édifices mènent à des résultats semblables dans les deux cas, sauf si ce n'est que le béton à base de fumée de silice et de cendres volantes permet des réductions d'émissions de l'ordre de 8,5% par rapport à un béton conventionnel. À part le béton et l'acier, les autres matériaux génèrent des quantités si minimes qu'on pourrait les considérer comme négligeables. La majorité des émissions de GES provient du transport des étudiants et des employés vers l'école et des besoins énergétiques qui subviennent le chauffage de la bâtisse. En comparant les deux bâtiments un à l'autre, on réalise que le pavillon principal a entraîné des dégagements de CO₂ importants. Toutefois, les méthodes de construction s'étant nettement améliorées au fil des années, l'avenir de l'industrie du béton semble plus prometteur : les premiers pas sont déjà faits.

Table des matières

SOMMAIRE	I
TABLE DES MATIÈRES	II
LISTE DES FIGURES	III
LISTE DES TABLEAUX	IV
REMERCIEMENTS	V
1 INTRODUCTION	1
2 MÉTHODE DE PRODUCTION DU BÉTON	3
2.1 COMPARAISON DES MÉTHODES : « VOIE HUMIDE » VS « VOIE SÈCHE »	3
2.2 LES AJOUTS CIMENTAIRES	5
2.3 LES PAVILLONS PRINCIPAL ET LASSONDE.....	6
3 MÉTHODOLOGIE	7
3.1 ÉVALUATION DU VOLUME DE BÉTON	7
3.1.2 Pavillons Lassonde	7
3.1.1 Pavillon principal	7
3.2 ÉVALUATION DES QUANTITÉS DES AUTRES MATÉRIAUX	9
3.2.1 Pavillons Lassonde	9
3.2.2 Pavillon principal	10
3.3 SOURCES D'ÉMISSIONS DE GES.....	12
3.3.1 Analyse des émissions de GES du béton	12
3.3.2 Émissions de GES des autres matériaux.....	16
3.3.3 GES attribuables aux besoins énergétiques des bâtiments	16
3.3.4 GES attribuables au transport des utilisateurs.....	19
3.3.5 GES attribuables à la phase de construction des bâtiments.....	19
3.4 COMPARAISON DES PAVILLONS POUR LES GES ATTRIBUABLES AUX MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION	20
3.5 COMPARAISON DES GES : BÉTON VS PORTRAIT GLOBAL DES BÂTIMENTS	21
4 CONCLUSION	24
RÉFÉRENCES	25
ANNEXES	26

Liste des figures

FIGURE 1 : MÉLANGE TYPIQUE DE BÉTON	3
FIGURE 2 : IMAGE DU BÂTIMENT SERVANT DE RÉFÉRENCE DANS LE LIVRE MEANS.....	10
FIGURE 3 : CONTRIBUTION EN POURCENTAGE DE GES POUR LA MISE À DISPOSITION DE 1M ³ DE BÉTON	12
FIGURE 4 : SOURCES DE GES ENTRANT DANS LA PRODUCTION DU BÉTON POUR LES PAVILLONS LASSONDE	13
FIGURE 5 : ÉMISSIONS DE CO ₂ ATTRIBUABLES AUX COMBUSTIBLES	17
FIGURE 6 : ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DE POLY	18
FIGURE 7 : COMPARAISON DES ÉMISSIONS DES MATÉRIAUX DES DEUX PAVILLONS	20
FIGURE 8 : PORTRAIT GLOBAL DES ÉMISSIONS DE GES DE POLYTECHNIQUE	23

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : VOLUME DE BÉTON PAR ÉTAGE (PAVILLON PRINCIPAL).....	8
TABLEAU 2 : QUANTITÉS DES MATÉRIAUX AUTRES QUE LE BÉTON POUR LES PAVILLONS LASSONDE.....	9
TABLEAU 3 : QUANTITÉS DES MATÉRIAUX POUR LE PAVILLON PRINCIPAL	11
TABLEAU 4 : ÉMISSIONS DE GES DES MATÉRIAUX AUTRES QUE LE BÉTON POUR LE PAVILLON PRINCIPAL.....	16
TABLEAU 5 : PRINCIPALES RECETTES DE BÉTON POUR LES PAVILLONS LASSONDE.....	26
TABLEAU 6 : ÉMISSIONS DE GES DU BÉTON À BASE DE FUMÉE DE SILICE	26
TABLEAU 7 : ÉMISSIONS DE GES DU BÉTON À BASE DE CENDRES VOLANTES.....	26
TABLEAU 8 : ÉMISSIONS DE GES DES MATÉRIAUX AUTRES QUE LE BÉTON POUR LE PAVILLON PRINCIPAL.....	27
TABLEAU 9 : ÉMISSIONS DE GES DES MATÉRIAUX AUTRES QUE LE BÉTON POUR LES PAVILLONS LASSONDE	27

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier Erik Bélanger qui a su me servir de guide tout au long du projet. De plus, je voudrais remercier Manuele Margni, analyste et agent de recherche au CIRAIG, qui a pu m'aider avec ses connaissances sur les émissions de gaz à effets de serre (GES). Aussi, il va de soi de remercier Normand Lebœuf, ingénieur de structure pour Pasquin, St-Jean et associés, Francis Forlini, directeur des ventes chez Demix Béton, Guylaine Dupont, coordonnatrice aux ventes chez Demix Béton, Michel Rose ing., directeur des grands projets de construction de Polytechnique et Hugo St-Denis, étudiant de 4^{ème} année travaillant sur le projet *Analyse du cycle de vie des pavillons Lassonde*.

1 Introduction

L'industrie du béton est présentement dans un ère de changement. En effet, les nouvelles technologies de production du béton sont élaborées dans un souci de développement durable et de protection de l'environnement. De plus en plus de programme de conscientisation et de prévention sont mise en place au sein des diverses usines de béton, et ce, dans le but de diminuer les impacts négatifs sur l'environnement tout en minimisant les coûts de production. En fait, c'est l'industrie cimentière qui permet de telles innovations. Plusieurs mesures ont été mises de l'avant telles que le remplacement de certaines matières, l'accroissement de l'efficacité énergétique et l'utilisation de combustibles de remplacement.[1] Ces pratiques ont permis au domaine de la construction de suivre le tournant vert et d'adopter une vision différente dans le design de bâtiment d'envergure.

À ce titre, en 2002, l'École Polytechnique a décidé de procéder à l'agrandissement de son établissement, et ce, en guidant sur une norme internationalement reconnue : la certification LEED. Un des points de ce programme touche l'utilisation de matériaux locaux et la réutilisation des ressources. Ainsi, on réduit les impacts dus au transport des matériaux et on allonge de cycle de vie de certains matériaux. Le béton utilisé pour les pavillons Lassonde va dans ce sens puisqu'il provient d'une usine avoisinante et l'utilisation de fumée de silice permet de minimiser les émissions de gaz à effet de serre (GES). Afin de mieux visualiser les avantages d'un tel béton, il serait intéressant de mesurer les impacts des matériaux de construction du pavillon principal et à ceux des pavillons Lassonde.

Il devient donc très attrayant d'analyser et de comparer les émissions de GES attribuables au béton de construction de ces deux bâtiments. De plus, une analyse plus poussée touchant les autres matériaux de construction utilisés, les besoins énergétiques des bâtiments, le transport des employés et des étudiants pourrait permettre d'obtenir une vue générale des émissions liées au béton par rapport à l'ensemble de l'École Polytechnique de Montréal.

2 Méthode de production du béton

Le béton n'est pas un matériel qui nécessite plusieurs étapes de production, mais la fabrication de ses constituants peut s'avérer beaucoup plus complexe. En fait, le béton est simplement un mélange plus ou moins homogène de diverses composantes. La figure ci-contre présente un mélange type de béton avec les proportions des divers ingrédients. Les quantités varient d'un mélange à l'autre en fonction des conditions de mise en place, de température et de résistance souhaitées.

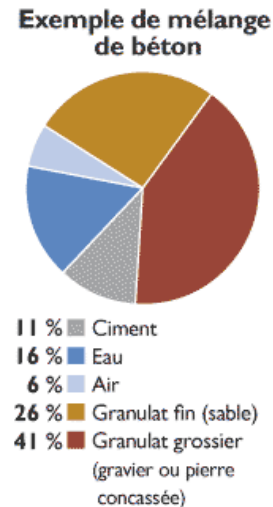


Figure 1 : Mélange typique de béton

2.1 Comparaison des méthodes : « Voie humide » vs « voie sèche »

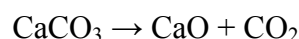
Un élément constitutif du béton qui n'est pas à négliger est sans aucun doute le ciment. En effet, c'est lui qui assure la cohésion entre les autres constituants du béton. La production du ciment Portland peut se faire par deux procédés bien distincts, l'un par « voie sèche » et l'autre par « voie humide ».

Avant même de débiter la fabrication du ciment, il faut extraire la pierre de la carrière et la transporter à l'usine. La première étape du procédé de fabrication du ciment, que ce soit par « voie sèche » ou « humide », est le concassage primaire ou grossier des granulats. On achemine d'abord la pierre vers des concasseurs qui en réduiront ainsi la taille. Ensuite, on l'entraîne dans d'autres concasseurs pour qu'elle atteigne un diamètre d'environ 7,5 cm.[2]

Puis, lorsque le procédé par « voie humide » est utilisé, on ajoute de l'eau aux composantes premières qui ont été préalablement bien dosées. Par la suite, on les broie à nouveau avant de les mélanger jusqu'à ce que la mixtion soit complètement homogène. Ce mélange assez consistant est ensuite dirigé vers le four à des températures extrêmes. Par ailleurs, lorsque le procédé se fait par « voie sèche », les matières premières bien broyées sont homogénéisées et conduites à sec vers le four. Cette phase est celle qui différencie les deux procédés. En effet, ils sont pratiquement les mêmes en ce qui a trait aux autres aspects.

Les matières premières bien broyées, aussi appelé le cru, seront ainsi exposées à des températures allant au-delà de 1 450 °C (2 650 °F). La principale matière première entrant dans la fabrication du ciment est le calcaire (CaCO₃). La longueur du four fabriqué de briques réfractaires atteint souvent celle d'un immeuble de 40 étages qu'on coucherait sur le côté.

Le cru finement broyé (par « voie sèche »), ou le mélange en suspension (par « voie humide »), y entre à la partie supérieure tandis qu'à l'autre extrémité du four brûle un feu d'une chaleur intense généré par la combustion à tirage forcé de charbon pulvérisé, de mazout ou de gaz. À titre informatif, le tirage forcé est une méthode de chauffage à haut rendement puisqu'elle permet d'introduire l'air de combustion à l'aide d'une turbine et les fumées produites sont aspirées par un extracteur. À environ 900°C, le calcaire subit une réaction chimique fixe : la décarbonatation. Le CO₂ ainsi libéré est un sous-produit direct de cette calcination.



C'est alors que certains éléments du mélange se dissipent sous forme de gaz dans le four. Les éléments restants forment pour leur part des petites boulettes de la taille approximative de billes, qu'on appelle « clinker ». Ne pouvant être manipulé à la sortie du four puisqu'il est trop chaud, le mélange est ensuite refroidi dans divers types de refroidisseurs.

Par la suite, il ne reste que les étapes de finalisation qui consistent d'abord à la mouture finale des éléments pendant laquelle on ajoute du gypse ou d'autres additifs (cendres volantes, ...) pour régler le temps de prise du béton. Ainsi, on est prêt à entreposer le tout en vrac et à charger les camions.

2.2 Les ajouts cimentaires

Les gouvernements et les entreprises tentant de faire des progrès dans le domaine des émissions de GES, les ajouts cimentaires sont de plus en plus populaires dans le domaine de la construction. En fait, ce sont des déchets qui proviennent du milieu industriel. Les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) et les fumées de silice sont les principaux ajouts cimentaires utilisés. Ces déchets résultent généralement des centrales électriques au charbon ou de l'industrie sidérurgique.

L'utilisation de ces ajouts est très simple : on remplace une partie du ciment utilisé par des ajouts cimentaires. Le ciment étant une source d'émissions de GES très importantes, on peut ainsi le remplacer par des déchets réutilisés qui permettent d'éviter l'émission de GES supplémentaire liée à la production du ciment. De plus, plusieurs propriétés du

béton sont accrues avec l'utilisation des ces ajouts telles que la résistance à la contrainte, la maniabilité, imperméabilité, etc.

2.3 Les pavillons principal et Lassonde

Pour le pavillon principal, construit majoritairement en 1957, on peut supposer que la méthode de fabrication par « voie humide » a été utilisée puisque cette méthode était la plus utilisée il y a plusieurs années. De plus, les bienfaits des ajouts cimentaires n'étaient pas encore connus à cette époque.

Avec les années, l'industrie cimentière tente d'apporter des améliorations en termes de rendement énergétique et d'émissions de GES. C'est la raison pourquoi on privilégie de plus en plus le procédé par « voie sèche ». Cette méthode nécessite moins d'énergie puisque les cimenteries réutilisent la chaleur du four dans une tour servant au préchauffage des matières premières avant qu'elles soient introduites dans celui-ci. De plus, cette méthode utilise un four beaucoup plus court étant donné que le cru est sec et qu'il a besoin peu de chaleur pour la calcination. Ainsi, on augmente le rendement des combustibles et on réduit les émissions de GES tout comme les autres impacts négatifs sur l'environnement. À cela, se joint l'utilisation d'ajouts cimentaires qui est apparue il y a quelques années. En effet, « l'industrie a aussi beaucoup augmenté l'emploi de sous-produits industriels en remplacement du ciment depuis 1990. »[3] Il est connu que des ajouts ont été utilisés pour les pavillons Lassonde et en se basant sur le fait que la grande majorité des usines utilisent aujourd'hui le même procédé, on peut affirmer que le ciment utilisé pour ce pavillon a été fabriqué selon le procédé par « voie sèche ».

3 Méthodologie

Il est primordial de bien connaître les étapes qui nous mènent à calculer les quantités de gaz à effet de serre (GES) produites lors de la construction de bâtiment de l'envergure des pavillons principal et Lasonde. Tout d'abord, il faut déterminer les volumes de béton utilisés lors de la construction des pavillons.

3.1 Évaluation du volume de béton

3.1.2 Pavillons Lasonde

Selon M. Normand Lebœuf, la construction des pavillons Lasonde a nécessité l'utilisation de plus de 20 645 m³ de béton. « Au total, 27 recettes de béton ont été utilisées pour couvrir toutes les conditions d'utilisation, de résistance, de mise en place ou de température [...]»[4] Aucun calcul n'a donc été nécessaire pour trouver le volume de béton utilisé, mais il fallait tenir compte des 27 différentes recettes. Ainsi, pour ce pavillon, nous nous sommes servis des masses volumiques des principales recettes pour obtenir une valeur moyenne de 2 300 kg/m³ (Guylaine Dupont, communication personnelle, 2007). La liste de ces recettes et de leur masse volumique se retrouve au tableau 5, en annexe.

3.1.1 Pavillon principal

Pour le pavillon principal, une méthode de calcul basée sur les plans du bâtiment a été utilisée afin de déterminer le volume de béton utilisé. Pour ce bâtiment, plusieurs hypothèses ont dues être posées étant donné qu'aucune donnée sur les quantités n'était disponible.

L'idée initiale était de calculer les volumes de béton approximatifs utilisés sur chaque étage, mais il était évident que cette méthode risquerait d'être trop demandante en

termes de temps et de charge de travail. D'abord, les volumes de béton du 4^{ème} étage (colonnes, murs, poutres, dalle) ont été calculés en supposant que ce niveau était représentatif des autres puisqu'il se situait au milieu du bâtiment. Il faut comprendre que le bâtiment est situé à flanc de montagne, donc que les superficies des planchers varient d'un étage à l'autre. De plus, les poutres et les colonnes au centre du bâtiment sont réputées pour être moyennes par rapport à celles des autres niveaux. En effet, celles des étages inférieurs doivent être plus grosses pour supporter une plus grande charge et celles des étages supérieurs plus petites puisque les charges sont réduites. Pour obtenir le volume de béton total du pavillon, les aires des planchers des autres étages ont été calculées et comparées avec celle du quatrième. Les résultats sont affichés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Volume de béton par étage (pavillon principal)

	Aires relatives (cm ²)	Volumes correspondants(m ³)
1^{er} étage	155	3 545
2^{ème} étage	202	4 625
3^{ème} étage	230	5 251
4^{ème} étage	230	5 251
5^{ème} étage	230	5 251
6^{ème} étage	230	5 251
Rotonde	5	113
Cages d'escaliers	3	69
Dalle des canaux	-	74
Total		29 430

Pour déterminer la masse de ce volume de béton total, il faudrait connaître la masse volumique de chaque mélange utilisé pour ce pavillon. Étant donné qu'aucune information concernant ce sujet n'est disponible, une hypothèse a été posée : la masse volumique moyenne du béton est d'environ 2 350 kg/m³ (Francis Forlini,

communication personnelle, 2007). Ainsi, on obtient une masse de 69 160 500 kg de béton pour l'ensemble du pavillon, soit 69 160 tonnes.

3.2 Évaluation des quantités des autres matériaux

3.2.1 Pavillons Lasonde

Pour obtenir les quantités des principaux matériaux de construction, il a fallu entrer en contact avec des gens qui ont travaillé sur le projet des pavillons Lasonde tels que Francis Forlini, Normand Lebœuf et Michel Rose. Les données nécessaires sur les quantités étaient disponibles par secteur (maçonnerie, intérieur, extérieur, ...) sous forme monétaire. Il fallait donc ramener ces valeurs en termes de quantités. Pour ce faire, les coûts unitaires par matériaux ont été ramassés. Le tableau qui suit présente les quantités des différents matériaux utilisés dans la construction de ce pavillon.

Tableau 2 : Quantités des matériaux autres que le béton pour les pavillons Lasonde

Matériau	Coût total	Coût main-d'œuvre	Coût matériau	Coût unitaire ¹	Quantité
Acier	-	-	2 956 183,42 \$	800,40 \$/t	3 693,38 t
Bois	781 698,54 \$	358 249,98 \$	337 171,76 \$	392,48 \$/t	859,1 t
Gypse	1 490 000,00 \$	890 00,00 \$	560 000,00 \$	345,09 \$/t	1 622,8 t
Briques	1 344 684,00 \$	739 576,20 \$	605 107,80 \$	358,96 \$/t	1 685,7 t
Peintures	467 000,00 \$	256 850,00 \$	210 150,00 \$	4 716,67 \$/t	44,6 t

Pour l'acier, la quantité et le coût des matériaux étant déjà connus, nous avons pu en déduire un coût unitaire approximatif. Pour le coût unitaire de la brique, on a trouvé 0,60 \$/unité, ce qui revient à 358,96\$/t. puisque la masse volumique de la brique d'argile est évaluée à 1,6 t/m³ [5]. Pour ce projet, la fenestration n'a pas été analysée puisque,

¹ Les coûts unitaires pour le bois, le gypse, la brique et la peinture proviennent de la quincaillerie Marcil et Frères Inc. à Ste-Martine. On a pris le soin de demander les prix coûtants puisque ce sont généralement les prix payés lors d'un projet de grande envergure.

premièrement, les données étaient complexes à trouver et puis, il aurait été impensable de tenir compte des fenêtres à l'intérieur de la bâtisse. Pour ces raisons, aucune donnée concernant les fenêtres ne se trouve dans ce rapport.

3.2.2 Pavillon principal

Pour le pavillon principal, la recherche de données concernant les matériaux utilisés pour le bâtiment s'est avérée plus difficile puisque la construction de cet édifice date de plusieurs années (1957). Il a donc fallu se fier aux estimations contenues dans le manuel de référence [6] pour déterminer les quantités des matériaux suivants : l'acier, le gypse et les peintures.



Figure 2 : Image du bâtiment servant de référence dans le livre MEANS

Dans ce manuel, il aurait été préférable d'utiliser les données d'estimations basées sur un établissement scolaire post-secondaire de 6 niveaux, mais cette catégorie ne s'y retrouvait pas. On a donc été contraint de se référer à un édifice à bureaux variant de 5 à 10 étages. La figure ci-dessus illustre la similarité entre le pavillon principal et l'édifice considéré dans le manuel de référence. Ce manuel donnait des coûts par pied carré de surface habitable. Ainsi, on a des coûts pour chaque domaine du bâtiment, que ce soit les structures, l'intérieur, les services et le revêtement. Par la suite, il ne reste qu'à rapatrier les coûts correspondants aux matériaux recherchés. On obtient donc les coûts

totaux de chacun des matériaux de construction. En se servant des coûts unitaires utilisés plus haut, il est possible de déterminer les quantités de ceux-ci (voir tableau 3).

Cependant, aucune donnée ne concernait ni le bois, ni les briques. Pour le bois, nous avons donc dû nous contenter de conserver les proportions bois/béton des pavillons Lasonde. Pour la brique, nous connaissions la hauteur et le périmètre du bâtiment, ce qui nous a permis d'obtenir l'aire des murs extérieurs. Par observation, on évalue que la brique occupe la moitié de la surface des murs. On obtient donc la superficie couverte par la brique. Les briques du pavillon faisant 6 cm de haut et 21 cm de long et en considérant le mortier autour de la brique, on peut déterminer une quantité approximative de briques.

Tableau 3 : Quantités des matériaux pour le pavillon principal

Matériau	Coût par pi ²	Coût total	Coût unitaire	Quantité
Béton	3,47 \$	2 753 166,36 \$	43,48 \$/t	63 320,3 t
Acier	5,10 \$	4 046 440,47 \$	800,40 \$/t	5 055,5 t
Bois	-	-	392,48 \$/t	1 251,3
Gypse	2,46 \$	1 951 812,46 \$	345,00 \$/t	5 657,4 t
Briques	-	-	358,96 \$/t	1 579,2 t
Peintures	0,79 \$	626 801,56 \$	4 716,67 \$	132,9 t

Ce tableau est très approximatif puisqu'il se base sur des estimations d'un édifice à bureau. D'ailleurs, la quantité élevée de gypse selon cette méthode est due au fait que, dans un tel bâtiment, les pièces sont beaucoup plus petites. Il y a donc plus de divisions et une plus grande quantité de panneaux de gypse est requise. Outre cette donnée qui peut sembler aberrante, les résultats pour l'acier et les peintures sont assez représentatifs.

Pour valider cette hypothèse, nous nous sommes servis du coût unitaire proposé par le manuel et nous l'avons appliqué au pavillon pour obtenir un tonnage de béton moyen. La valeur obtenue, étant très près de la valeur préalablement calculée, vient donc confirmer la validité de l'estimation des quantités. En effet, l'écart entre cette valeur et celle trouvée par l'analyse des plans est de 8,4%.

3.3 Sources d'émissions de GES

3.3.1 Analyse des émissions de GES du béton

D'abord, pour le pavillon principal, on retrouve une quantité totale de béton de 69 160 tonnes. Comme on peut le remarquer à la figure 3, la fabrication du ciment Portland est la phase émettant le plus de GES dans le processus de production d'un mètre cube de béton. Cette figure illustre toutes les sources de GES entrant dans la fabrication du béton en indiquant leur contribution en pourcentage. On considère donc que 94,4% des émissions liées au béton sont produites par le procédé de fabrication du ciment. On pose d'abord que le ciment constitue 11% du mélange et on obtient des émissions de l'ordre de 6 239,8 t CO₂ éq. pour le ciment. Au total, les émissions attribuables au béton s'élèvent donc à 6609,9 t CO₂ éq.

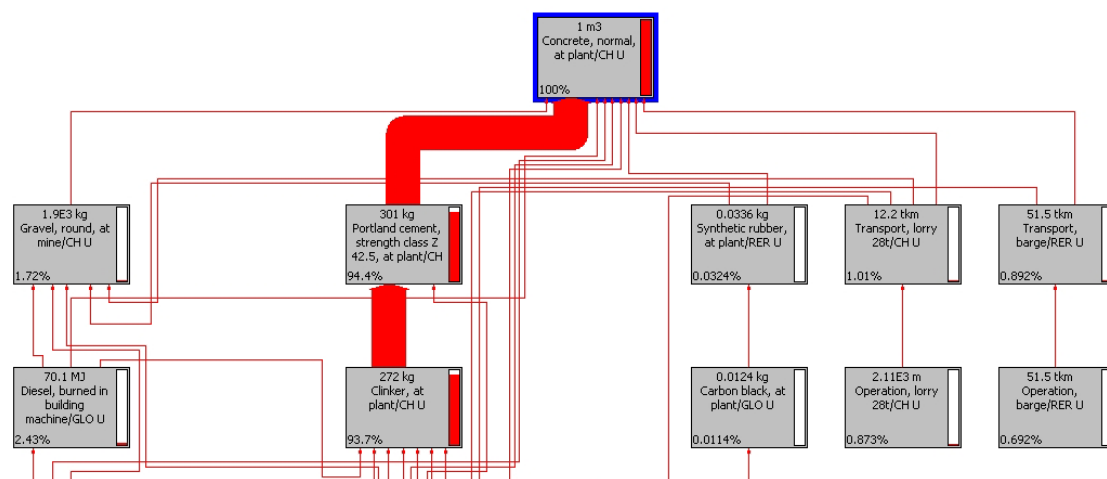


Figure 3 : Contribution en pourcentage de GES pour la mise à disposition de 1m³ de béton

Pour les pavillons Lassonde, il y a plusieurs constituants du béton qui sont des sources de GES. En effet, comme il a été mentionné à la section 2.2, des ajouts cimentaires ont été utilisés dans le béton dans le but de diminuer les émissions de gaz à effets de serre. Pour le projet des pavillons Lassonde, 461,64 tonnes de fumée de silice et 733,47 tonnes de cendres volantes ont été utilisées en remplacement du ciment Portland dans la fabrication du béton (Guylaine Dupont, communication personnelle par courriel, 2007). À partir de ces données et en se basant sur la composition typique du béton illustrée à la figure 1, on arrive à établir un portrait assez précis des émissions de GES du béton pour ce pavillon. Il faut toutefois analyser les émissions du béton en quatre phases distinctes telles qu'indiquées à la figure 4.

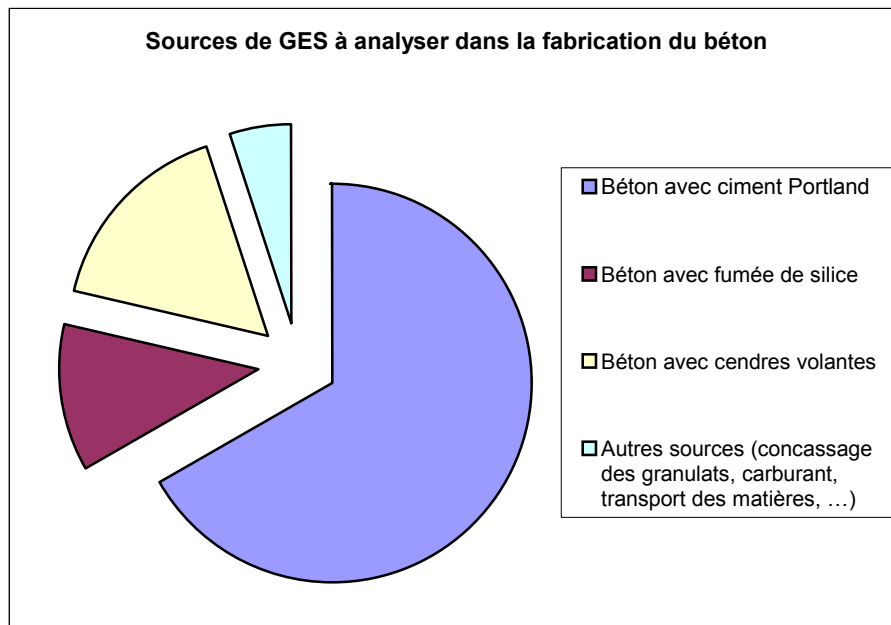


Figure 4 : Sources de GES entrant dans la production du béton pour les pavillons Lassonde

On détermine en premier lieu les émissions causées par les carburants, le concassage des granulats et le transport des matières. Les émissions causées par ces différentes sources

représentent environ 5,6% des émissions totales du processus de fabrication du béton (voir figure 3). Pour chiffrer ces émissions de GES, il faut donc supposer que le béton entier est totalement fait à partir de ciment Portland. En posant l'hypothèse que la masse volumique des bétons utilisés pour les pavillons Lassonde est de 2,3 tonnes/m³ et en connaissant le volume de béton, on détermine la masse totale du béton utilisé, soit 47 483,50 tonnes. Selon la figure 1, on sait que 11% du béton est constitué de ciment (ou d'ajouts cimentaires), ce qui représente 5 223,19 tonnes dans notre cas. En appliquant le facteur d'émission du ciment Portland, on obtient les émissions de ce constituant auxquelles on peut appliquer une simple règle de trois pour obtenir une quantité de GES produits de 254,2 tonnes de CO₂ éq. pour la partie des autres constituants. On procède de cette manière puisque le facteur d'émission du ciment est connu alors qu'il serait trop élaboré de trouver un facteur qui tiendrait compte du carburant, du concassage, etc. : le résultat final étant le même.

Par la suite, on peut obtenir les émissions de GES attribuables au béton à base de ciment Portland. Puisqu'on connaît la quantité d'ajouts cimentaires qui a été utilisée, on peut en déduire la quantité de ciment, soit 4 028,08 tonnes. Il ne reste qu'à mettre en application le facteur d'émission de 0,8202 t CO₂ éq./t pour déterminer les émissions de GES du ciment qui nous permettront de trouver les émissions attribuables au béton à base de ciment Portland. En effet, en sachant que cette valeur correspond à 94,4% des émissions du béton, on obtient une quantité totale de 3 500 t CO₂ éq.

Pour le béton à base de fumée de silice, les émissions qui étaient attribuables au ciment sont nulles, car il est remplacé par la fumée de silice provenant de l'industrie

métallurgique. Ainsi, seulement une fraction des émissions de GES de cette industrie sera attribuée à la production du béton. Puisque l'industrie bétonnière paie pour se procurer cet ajout cimentaire et qu'elle en tire un profit, les émissions de gaz à effets attribuables au béton à base de fumée de silice seront obtenues à l'aide de la méthode d'imputation économique. De cette manière, la compagnie qui produit le béton devient responsable d'une partie des GES liés à la production du métal, processus qui mène à la production de la fumée de silice. Cette imputation se fait en fonction du rapport du coût d'une tonne de fumée de silice sur le coût de vente d'une tonne de béton à base de fumée de silice (voir tableau 6 en annexe). Par cette méthode, nous obtenons un facteur d'émissions de 0,171 t CO₂ éq. pour des émissions totales atteignant les 79,0 t CO₂ éq.

Pour ce qui est de béton à base de cendres volantes, le même principe d'imputation économique s'applique, car les cendres remplacent le ciment dans le béton. Cependant, dans ce cas-ci, l'industrie bétonnière devient partiellement responsable des GES assignés à la centrale électrique au charbon qui produit les cendres volantes. Le facteur d'émissions sera donc plus faible et le béton à base de cendres volantes émettra 80,4 t CO₂ éq.

De plus, dans la partie des GES attribuables au béton, on se doit de considérer les émissions causées par le transport du béton de l'usine vers l'École Polytechnique de Montréal. En estimant la quantité de béton utilisé à 47 484 tonnes et en se référant au nombre de kilomètres entre l'usine et l'école, soit 10 km, on peut quantifier les émissions de GES produites par le transport du béton (Francis Forlini, communication

personnelle, 2007). On obtient donc des émissions de 77 t CO₂ éq. pour le transport du béton.

3.3.2 Émissions de GES des autres matériaux

Les quantités de matériaux calculés plus haut nous permettent de déterminer le tonnage total en CO₂ éq. des émissions de GES causées par les matériaux de construction utilisés autres que le béton. Le tableau 4 permet de comparer les dégagements de GES des matériaux entre eux pour les pavillons principal et Lassonde. En annexe, les tableaux 8 et 9 donnent les quantités pour chaque pavillon ainsi que les facteurs d'émissions qui nous ont permis d'aboutir à ces résultats.

Tableau 4 : Émissions de GES des matériaux autres que le béton pour le pavillon principal

Matériaux	GES pavillon principal (t CO ₂ éq.)	GES pavillons Lassonde (t CO ₂ éq.)
Acier	7 978,6	5828,9
Bois	791,2	543,2
Gypse	1 917,6	550,0
Briques	558,8	596,5
Peintures	255,3	85,7

3.3.3 GES attribuables aux besoins énergétiques des bâtiments

Les émissions de GES assignables aux besoins énergétiques des bâtiments regroupent pour leur part toutes les sources utilisées à des fins de chauffage, de climatisation et d'énergie. La première partie à considérer dans l'évaluation des émissions de GES dues aux besoins énergétiques consiste à déterminer la portion émise par les combustibles employés dans les bâtiments. À ce titre, on note le gaz naturel, le diesel, l'huile et d'autres combustibles en plus petites quantités (acétylène, butane, propane, ..). L'effet

de ces derniers est jugé négligeable tellement ils sont peu nombreux. Les données concernant les quantités de GES émis sont répertoriées dans le rapport l'environnemental de l'école de cette année (Lareau, 2007).[6]

D'une part, le gaz naturel est généralement utilisé pour chauffer l'eau des bâtiments. Pour parvenir à calculer les quantités de GES émis, un coefficient d'émission de 1,891 kg CO₂ éq./m³ a été utilisé. Par ailleurs, le diesel, servant aux génératrices et aux véhicules d'entretien de Poly, a un coefficient de 2,83 kg CO₂ éq./L. Pour sa part, l'huile #2, en moins grande quantité, est automatiquement utilisée sous un seuil de température fixé. Ainsi, elle est utile pour le chauffage en période de grand froid. Sur le graphique ci-dessous, on constate que le gaz naturel constitue le combustible qui émet le plus de CO₂ (89%) pour les trois dernières années, tandis que le diesel (0,5%) a peu d'influence sur les émissions totales des combustibles.

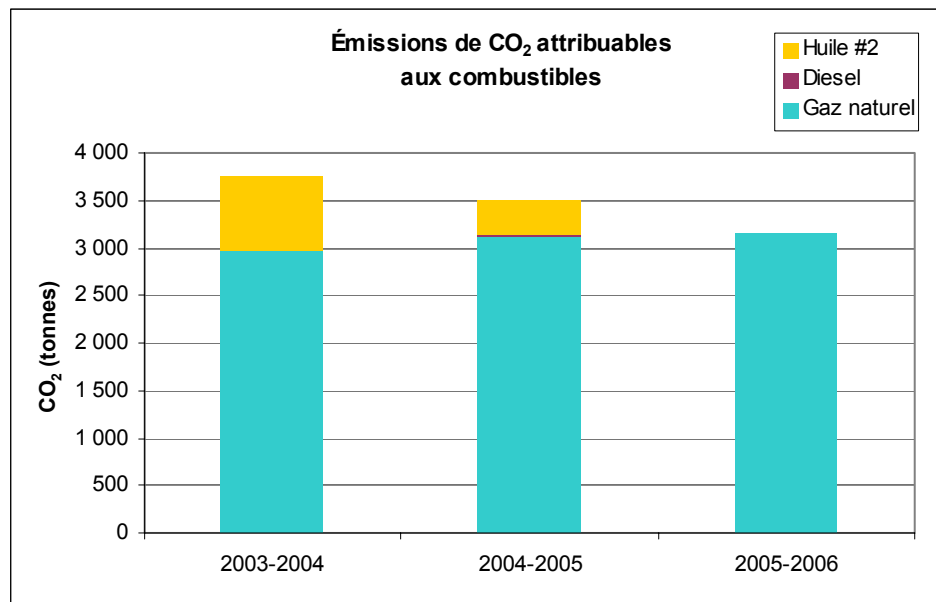


Figure 5 : Émissions de CO₂ attribuables aux combustibles

En somme, environ 3 159 t CO₂ éq. sont attribués annuellement aux combustibles utilisés dans le bâtiments. « La baisse des émissions [au fil des années] est en partie attribuable aux températures plus élevées durant la période hivernale. En effet, selon le Centre de Ressources en Impacts et Adaptation au Climat et à ses Changements (CRIACC, 2007), les moyennes des températures hivernales à Montréal ont été de -9,3°C en 2003-2004, de -8,3°C en 2004-2005 et de -5,7°C en 2005-2006. »[6]

Les besoins énergétiques des bâtiments couvrent aussi l'électricité consommée par ceux-ci. Il a été possible de connaître la consommation en électricité de l'École Polytechnique de Montréal au cours des 10 dernières années (Michel Lareau, 2007). La figure ci-dessous représente son évolution au fil des ans pour le pavillon principal.

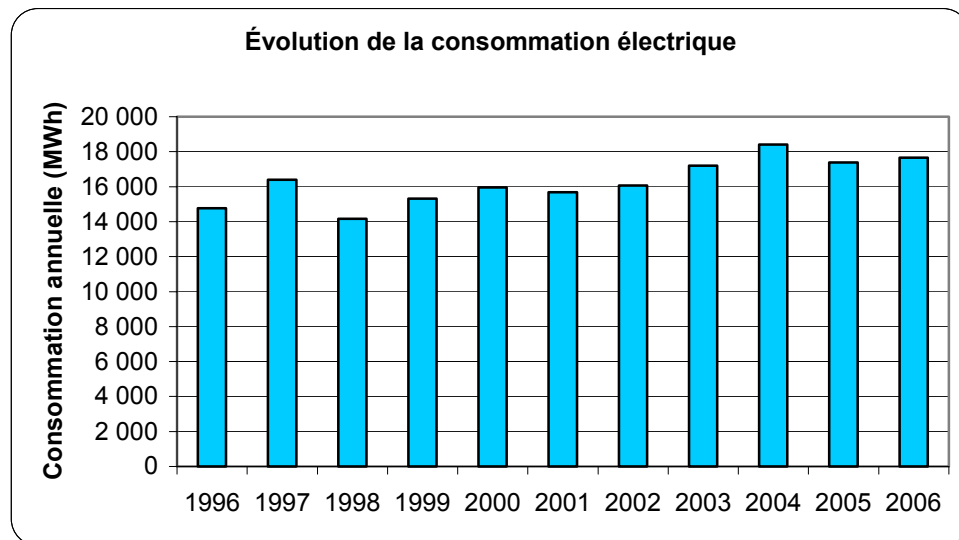


Figure 6 : Évolution de la consommation électrique de Poly

Pour l'année 2006, les consommations en électricité du pavillon principal s'élevaient à 17,7 GWh tandis que celles des pavillons Lassonde à 8,1 GWh (non illustrée sur la figure 5). On suppose que cette énergie est basée sur un approvisionnement entièrement

hydroélectrique. Ainsi, on obtient un dégagement total annuel de GES de l'ordre de 226 t CO₂ éq.

3.3.4 GES attribuables au transport des utilisateurs

Par ailleurs, la quantité de GES émis par les moyens de transport des utilisateurs des pavillons Principal et Lasso n'est pas à négliger. Pour l'étude de cette source de GES, un sondage, réalisé en mai 2006 par le Comité de gestion environnementale de Polytechnique (COGEP, 2006), a été fait auprès des employés et des étudiants de l'École Polytechnique de Montréal. Cette enquête a permis de connaître les moyens de transports utilisés et les distances parcourus par chacun des 845 répondants (569 étudiants et 276 employés) pour se rendre à l'école. On constate que les employés émettent près de 2 646 tonnes de CO₂ éq., valeur légèrement supérieure à celle des étudiants, dont les émissions de GES avoisinent les 1 935 tonnes de CO₂ éq.

Au total, près de 4 581 tonnes de CO₂ éq. sont émises par le transport des utilisateurs du pavillon. Toutefois, ce résultat ne tient pas compte des déplacements à l'extérieur pour le travail (auto, avion, ...) et il ne considère seulement que deux semaines de vacances annuelles pour les employés. De plus, on doit poser l'hypothèse que la moitié de la population étudiante est présente durant la session d'été.

3.3.5 GES attribuables à la phase de construction des bâtiments

Dans cette section, on définit les GES émis lors de la phase de construction des bâtiments comme étant les émissions causées par la machinerie et l'équipement utilisés. En effet, lors d'un bilan des émissions de GES d'un projet, il faut quantifier les impacts attribuables aux outils de construction. Dans le présent projet, les données concernant le

pavillon principal étaient inexistantes, alors que pour les pavillons Lassonde, la recherche entraînerait une perte de temps immense pour l'importance de l'information. Selon Manuele Margni, les GES attribuables à la phase de construction peuvent être jugés négligeables. Cette hypothèse est basée sur son expérience de travail et sur l'analyse de plusieurs projets semblables.

3.4 Comparaison des pavillons pour les GES attribuables aux matériaux de construction

Lorsqu'on compare les émissions de GES des matériaux de construction de chacun des pavillons, on constate que la construction des pavillons Lassonde est beaucoup plus saine pour l'environnement que celle du pavillon principal, du moins pour ce qui a trait aux émissions de GES. Toutefois, comme il a été mentionné auparavant, les émissions liées au gypse ne constituent pas un référence de confiance puisque l'outil d'estimation utilisé était basé sur un bâtiment qui comportait beaucoup plus de divisions.

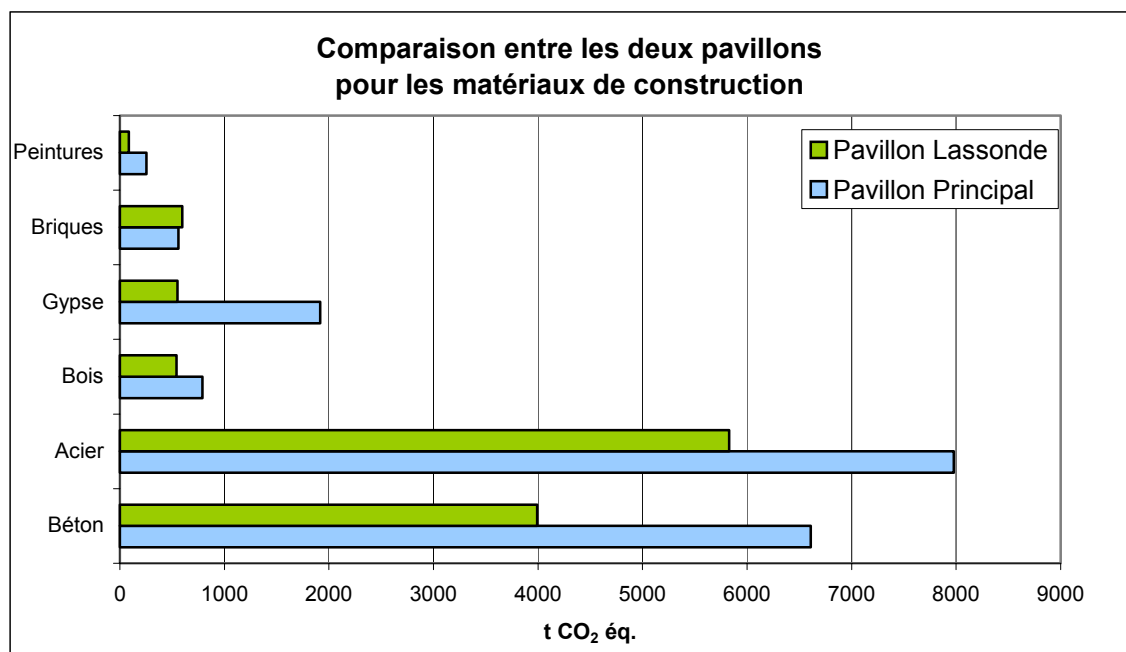


Figure 7 : Comparaison des émissions des matériaux des deux pavillons

De plus, on réalise que l'acier est un matériau qui produit énormément de polluants atmosphériques et qu'il serait intéressant de développer des méthodes moins dommageables pour l'environnement. Lorsqu'on s'attarde aux bétons utilisés dans les pavillons, on remarque que le fait d'avoir ajouter de la fumée de silice et des cendres volantes a diminué amplement les émissions de GES. En effet, lorsqu'on remplace une tonne de ciment par un de ces ajouts cimentaires, on évite des émissions d'environ une tonne de CO₂ éq. Pour leur part, ces liants de remplacement sont réutilisés dans le but d'accroître les propriétés du béton tout en limitant les émissions de GES.

On peut chiffrer les réductions engendrées par l'utilisation des ces ajouts. En supposant que tout le béton des pavillons Lassonde est fait à base de ciment Portland, on obtiendrait des émissions s'élevant à 4 615 t CO₂ éq., alors que l'addition de fumée de silice et cendres volantes réduisent ce nombre à 3 991 t CO₂ éq. Ces nouveaux constituants du béton permettent donc de réduire de 14% les émissions de GES et il est à noter que leur quantité était minime par rapport à celle du ciment Portland. On peut s'imaginer que l'utilisation en masse de ces ajouts pourrait être très bénéfique pour l'environnement. Pour le pavillon principal, l'acier (44,1%) et le béton (36,5%) sont les matériaux dominants en termes d'émissions de GES, tout comme pour les pavillons Lassonde où l'acier (50,3%) est présent en proportion plus grande.

3.5 Comparaison des GES : béton vs portrait global des bâtiments

Par la suite, il est intéressant de faire une comparaison globale pour avoir une vue d'ensemble des émissions de GES attribuées à l'école Polytechnique. Pour ce faire, il

faut utiliser les données annuelles pour les émissions liées aux besoins énergétiques et aux transports des utilisateurs des bâtiments. Pour ce qui est des matériaux de construction, il faut utiliser la durée de vie des bâtiments pour pouvoir ramener les émissions totales à des valeurs annuelles. Le ministère évaluait la durée de vie d'un tel immeuble à environ 40 ans. Pour la conception des deux pavillons, cette valeur a servi de base pour les calculs (Michel Rose, communication personnelle par courriel, 2007). Évidemment, un bâtiment bien conçu et entretenu a une durée de vie beaucoup plus grande, mais il est difficile de chiffrer la durée de vie réelle de l'établissement.

La figure 8 illustre toutes les émissions de GES provenant de l'École Polytechnique de Montréal. Il est évident que les matériaux de construction sont pratiquement négligeables par rapport aux combustibles utilisés et aux transports des employés et des étudiants, exception faite du béton et de l'acier. En fait, ils représentent 8,5% des émissions totales.

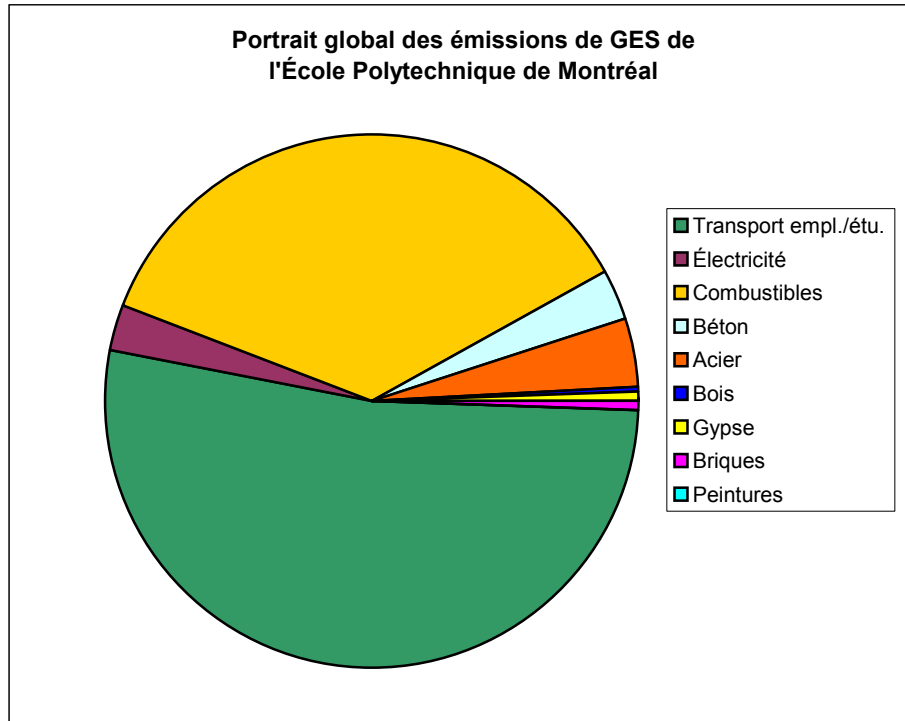


Figure 8 : Portrait global des émissions de GES de Polytechnique

En observant un tel portrait, on se doit de revoir les moyens de transport que nous utilisons, car le transport des employés et des étudiants représente 52,6% des émissions totales de l'école.

4 Conclusion

La principale difficulté rencontrée pendant le projet était le manque d'informations quant aux données sur les quantités. De plus, dû au fait que le pavillon principal est plus vieux, les informations étaient souvent inexistantes et il fallait souvent faire des hypothèses en tentant de les valider par la suite. Selon l'échéancier fixé au départ, moins de temps aurait dû être passé sur le calcul de volume de béton pour le pavillon principal. De plus, les nombreux téléphones, les rencontres, les courriels et les recherches sur Internet ont entraînés beaucoup de pertes de temps puisqu'il n'était pas prévu que les fouilles s'avèrent si infructueuses. Toutefois, je suis fier d'avoir pu terminer le projet dans les délais exigés. L'objectif d'obtenir un portrait global du comportement de l'École Polytechnique en matière d'émissions de GES a été atteint. L'analyse du projet amène une vision plus écologique et environnementale du domaine de la construction. En effet, j'ai vraiment l'impression que l'accessibilité aux moyens de transports moins polluants devrait être accrue afin de diminuer les impacts de cette source de GES sur le milieu. Le transport pour se rendre à l'école ne devrait pas figurer en tête de liste des sources de GES. Certaines mesures de conscientisations devront être mises sur pieds. Par ailleurs, pour ce qui est du béton, les progrès et les innovations se doivent de continuer dans le même lignée puisque les résultats démontrent très bien que le remplacement du ciment par des ajouts cimentaires s'avère une solution avantageuse et viable pour l'environnement.

Références

1. Association Canadienne du Ciment, « *Rapport sur la durabilité de l'industrie du ciment au Canada 2006* », In Site de l'Association Canadienne du Ciment.
2. Association Canadienne du Ciment, « *Fabrication du ciment* », In Site de l'Association Canadienne du Ciment. [En ligne]. Disponible : <http://www.cement.ca/cement.nsf/f/0CEED5F95CB442AD852568C5004EDC07?OpenDocument> . [Consulté le 20 mars 2007].
3. Association Canadienne du Ciment, « *Changement climatique* », In Site de l'Association Canadienne du Ciment. [En ligne]. Disponible : <http://www.ciment.ca/cement.nsf/f/B79B3DB15B0A06C485256D1D005A2F6A?opendocument> . [Consulté le 20 mars 2007].
4. École Polytechnique de Montréal, « *Prix d'excellence pour le projet des pavillons Lassonde* », In Site de l'École Polytechnique de Montréal. [En ligne]. Disponible : <http://www.polymtl.ca/infochantiers/lassonde/AICC.php> . [Consulté le 6 mars 2006].
5. ALTHAUS Hans-Jorg, DOKA, Gabord, DONES, Roberto, HECK, Thomas, HELLWEG, Stefanie, HISCHIER, Roland, NEMECEK, Thomas, REBITZER, Gerald et SPIELMANN. 2004. *Overview and Methodology - Data v1.1*. Dübendorf : Swiss Centre of Life Cycle Inventories. 75 p. Ecoinvent report no 1.
6. Reed Construction Data Inc., *RS MEANS-Square foot costs 26th annual edition*, Constructions Publishers & Consultants, 2005
7. Comité de gestion environnementale de Polytechnique, « *Rapport sur l'environnement 2005-2006* », In Site de l'École Polytechnique de Montréal. [En ligne]. Disponible : http://www.polymtl.ca/enviropoly/docs/documents/Rapport_environnement_2005-2006.pdf . [Consulté le 27 mars 2007].
8. ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL. BIBLIOTHÈQUE. « *Guide de présentation des citations et des références bibliographiques* ». In Site de la Bibliothèque de l'École Polytechnique de Montréal,[En ligne].

Annexes

Tableau 5 : Principales recettes de béton pour les pavillons Lasso

Types de recettes	Masses volumiques (kg/m ³)
S252C21P	2300
W402T310	2285
W402631A	2245
S352621P	2315
W402T910	2210
W402691A	2220
S402621P	2345
S352T21P	2380

Tableau 6 : Émissions de GES du béton à base de fumée de silice

		Unités
Coût d'une tonne de fumée de silice	5.89 \$	/t
Coût d'un mètre cube	125.00 \$	/m ³
Coût d'une tonne de béton avec fumée	54.35 \$	/t
Facteur d'imputation	0.10838	
Facteur d'émi. pour une tonne d'acier (steel, low-alloyed, at plant)	1.5782	t CO ₂ éq./t
Partie attribuable au béton	0.171039	t CO ₂ éq./t
Qté de fumée de silice	461.64	
GES totaux	79.0	

Tableau 7 : Émissions de GES du béton à base de cendres volantes

		Unités
Coût d'une tonne de fumée de silice	5.89 \$	/t
Coût d'un mètre cube	125.00 \$	/m ³
Coût d'une tonne de béton avec fumée	54.35 \$	/t
Facteur d'imputation	0.10838	
Facteur d'émi. pour une tonne d'acier (electricity, hard coal, at power plant)	1.0115	t CO ₂ éq./t
Partie attribuable au béton	0.10962232	t CO ₂ éq./t
Qté cendres	733.47	
GES totaux	80.4	

Tableau 8 : Émissions de GES des matériaux autres que le béton pour le pavillon principal

Matériau	Quantités (t)	t CO₂ éq. unitaire	t CO₂ éq. total
Acier (t)	5 055,5	1.5782	7 978,6
Bois	1 251,3	0.6323	791,2
Gypse (kg)	5 657,4	0.33895	1 917,6
Briques	1 579,2	0.35383	558,8
Peintures	132,9	1.9214	255,3

Tableau 9 : Émissions de GES des matériaux autres que le béton pour les pavillons Lasso

Matériau	Quantités (t)	t CO₂ éq. unitaire	t CO₂ éq. total
Acier	3 693,38	1.5782	5 828,9
Bois	859,1	0.6323	543,2
Gypse	1 622,8	0.33895	550,0
Briques	1 685,7	0.35383	596,5
Peintures	44,6	1.9214	85,7