

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
CONCEPTION ET RÉHABILITATION
M.Ing

PAR
Saliha MESSAOUDI YAHMI

DÉVELOPPEMENT D'UN CATALOGUE DE DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL
DES CHAUSSÉES POUR LA VILLE DE LONGUEUIL

MONTRÉAL, LE 5 JANVIER 2011

©Tous droits réservés, Saliha Messaoudi Yahmi, 2011

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE

M. Gabriel J. Assaf, directeur de mémoire

Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M^{me} Michèle St-Jacques, présidente du jury

Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Claude Bruxelle, membre du jury

Consultant en infrastructures urbaines.

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

LE 3 DÉCEMBRE 2010

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier, en premier lieu, mon directeur de recherche, M. Gabriel J. Assaf, pour son soutien et ses conseils. Il fut et il est l'inspiration de ce travail.

J'aimerais également remercier M. Christian Fallu, directeur du génie à la Ville de Longueuil, pour m'avoir fourni toutes les ressources possibles, pour m'avoir encouragé à persévirer et pour tout le temps qu'il m'a accordé pour mener mon projet à bon port. Il en va de même pour mon chef de service, M. Alain Daigle, pour son soutien et sa disponibilité, de même qu'à tous mes collègues qui ont pris part, de près ou de loin, à ce travail.

J'aimerais aussi adresser un remerciement tout particulier à M. Luc Chartrand pour sa disponibilité. Il a été un interlocuteur privilégié sur bien des aspects de cette recherche.

Je tiens à remercier mes chers parents pour les valeurs qu'ils m'ont inculquées et leur soutien continu.

Je ne saurais clore cette page de remerciements sans dédier ce travail à mon entourage, sans qui il n'aurait jamais vu le jour. Je pense bien évidemment à mon mari Rabah, mes filles Sara et Céline et mon petit dernier Rayan Lounes, sans oublier mes frères et sœurs. Qu'ils trouvent ici toute la gratitude pour leur soutien et leur patience.

DÉVELOPPEMENT D'UN CATALOGUE DE DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL DES CHAUSSÉES POUR LA VILLE DE LONGUEUIL

Saliha Messaoudi Yahmi

RÉSUMÉ

Ce travail de mémoire est réalisé dans le cadre d'un mandat qui m'a été confié par la Ville de Longueuil pour le développement d'un catalogue de dimensionnement structural des chaussées. Ce mandat découle de la recommandation du consortium Dessau-Soprin/Groupe SM dans son rapport final portant sur le programme d'inventaire et d'entretien des infrastructures municipales en 2004. Il s'agit de préciser de façon rationnelle des structures types de chaussées selon la nature du sol, après avoir relevé au préalable les données de circulation sur le réseau afin de déterminer les caractéristiques du trafic.

Le premier chapitre situe la problématique, définit les objectifs et l'envergure du projet, puis décrit les étapes et la méthodologie suivie.

Le second chapitre présente le concept des structures des chaussées, les types de chaussées, les sollicitations et les principales méthodes de dimensionnement structural des chaussées les plus utilisées de nos jours, soit la méthode empirique et la méthode mécaniste empirique. Ce chapitre présente également les particularités de la chaussée municipale, avec un rappel des effets du cycle gel-dégel sur la chaussée dans le contexte climatique québécois.

Le troisième chapitre présente les caractéristiques du réseau routier et des chaussées de la Ville de Longueuil ainsi que les besoins en dimensionnement structural. On y aborde l'exploitation des résultats des études externes réalisées depuis 2002 pour l'élaboration de l'inventaire des infrastructures municipales et d'autres mandats externes, tels que les comptages routiers pour la classification fonctionnelle du réseau. Ce chapitre présente également l'exploitation et le traitement des études géotechniques pour la définition des caractéristiques des sols sur tout le territoire de Longueuil. Finalement un arbre décisionnel est présenté pour faciliter le choix du type de structure (souple ou rigide) pour l'élaboration du catalogue.

Le quatrième chapitre présente la méthodologie de dimensionnement structural retenue pour l'élaboration du catalogue des chaussées souples, à savoir l'adaptation de la méthode AASHTO (empirique 1993) par le ministère des Transports du Québec (MTQ) pour le dimensionnement structural des chaussées souples (logiciel Chaussée 2).

Le cinquième chapitre présente les étapes de l'élaboration du catalogue de dimensionnement structural des chaussées souples. Le catalogue sera présenté sous forme de fiches faciles à utiliser, où l'on trouve des structures de chaussée, proposées selon la nature du sol support et la classification fonctionnelle de la section de chaussée.

Le sixième chapitre présente les étapes de l’élaboration du catalogue de dimensionnement structural des chaussées rigides pour les cas particuliers que sont les chaussées fortement sollicitées par les véhicules lourds. Le logiciel *WinPAS* est utilisé pour le calcul structural et le logiciel «Chaussée 2» pour la détermination des épaisseurs requises pour la protection contre le gel. Tout comme pour le catalogue des chaussées souples, celui des chaussées rigides sera présenté sous forme de fiches faciles à utiliser, où l’on trouve des structures de chaussées, proposées selon la nature du sol support et la classe du trafic.

Le septième chapitre traite des impacts économique et environnemental du projet de catalogue de dimensionnement structural des chaussées pour la Ville de Longueuil.

Mots clés : chaussée, dimensionnement, structural, catalogue, sol

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE	3
1.1 Problématique	3
1.2 Objectif	3
1.3 Contraintes et limites	4
1.4 Envergure	4
1.5 Étapes et méthodologie	5
CHAPITRE 2 LES CHAUSSÉES ET LE DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL	7
2.1 Chaussée	7
2.1.1 Structure de chaussée	7
Constitution d'une structure de chaussée	7
2.1.2 Les différents types de structures de chaussée	9
2.2 Le dimensionnement structural des chaussées	14
2.2.1 Dimensionnement théorique des structures de chaussées souples	15
Méthodes empiriques	15
Méthodes mécanistes-empiriques	16
Méthode incrémentale	17
2.3 Revue bibliographique des méthodes de dimensionnement structural des chaussées	18
2.3.1 Villes en Amérique du Nord	18
2.3.2 Au Canada	19
2.4 Particularité des chaussées municipales	20
2.4.1 Types de chaussées municipales	21
2.4.2 Environnement et contraintes	21
2.4.3 Sollicitations	22
2.5 Phénomène de dégradation des chaussées dûe au gel et au dégel	22
2.6 Conclusion	24
CHAPITRE 3 CONTEXTE SPÉCIFIQUE DE LONGUEUIL ET BESOIN EN DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL DES CHAUSSÉES	25
3.1 Introduction et mise en situation	25
3.2 Description des caractéristiques du réseau routier de la Ville de Longueuil	26
3.2.1 Résultats de l'évaluation de l'état du réseau routier	26
État visuel de la surface (indice PCI)	27
Confort au roulement (indice d'uni)	27
Analyse structurale (indice de portance)	29
État global (indice OCI)	30
3.2.2 Constat à la suite de l'analyse statistique	31
Indice d'état visuel (PCI)	31
Indice de confort au roulement	31

3.3	Indice de portance (mars 2004)	32
3.4	Indice d'état global (OCI)	32
3.2.3	Synthèse des résultats de l'étude des chaussées (Consortium, 2004).....	33
3.2.4	Synthèse des résultats de la mise à jour (Consortium, 2006)	34
3.3	Recommandations	36
3.4	Caractérisation des particularités de la Ville de Longueuil	36
3.4.1	Objectifs de performance et durée de vie	36
3.4.2	Caractérisation des sols supports de Longueuil.....	38
3.4.3	Interprétation et recommandations	40
Phase avant projet.....	42	
Phase construction	43	
3.4.4	Caractérisation du trafic	44
3.5	Cheminement décisionnel pour le catalogue	44
3.6	Conclusion	46
 CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE DE DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL		
4.1	Méthode de dimensionnement structural des chaussées souples du MTQ	47
4.2	Calcul structural	48
4.2.1	Équation de l'AASHTO	48
4.2.2	Principe d'application de l'équation de l'AASHTO	49
4.2.3	Module de résilience.....	51
4.3	Dimensionnement au gel.....	53
4.3.1	Protection partielle - Gel 1994	53
4.3.2	Protection à soulèvement contrôlé.....	55
4.4	Débit de circulation et trafic lourd	58
4.5	Justification de l'approche retenue pour le catalogue	59
4.5.1	Durée de vie.....	59
4.5.2	Dimensionnement au gel	60
4.5.3	Climat	60
4.5.4	Trafic	60
4.5.5	Autres	61
 CHAPITRE 5 CATALOGUE DE DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL DES CHAUSSÉES SOUPLES		
5.1	Introduction	62
5.2	Hypothèses et données de calculs	62
5.2.1	Données climatiques.....	62
5.2.2	Sol support.....	63
5.2.3	Trafic	64
5.3	Matériaux	65
5.4	Démarche de détermination d'une structure de chaussée	66
5.4.1	Exemple d'application.....	67
Objectif	67	
Climat	68	
Choix de la structure.....	68	

5.5	Structures de chaussée selon la classification fonctionnelle	68
5.5.1	Structures types pour les rues locales	68
5.5.2	Structures types pour les rues collectrices	72
5.5.3	Structures types pour les artères secondaires	75
5.5.4	Structures types pour les artères principales.....	78
5.6	Conclusion	81
CHAPITRE 6 CAS PARTICULIER : CHAUSSÉES RIGIDES.....		82
6.1	Introduction.....	82
6.2	Méthode AASHTO 1993	82
6.3	Les variables de conception	83
6.3.1	Vie utile ou période de performance	83
6.3.2	Période d'analyse.....	84
6.3.3	Trafic	84
6.3.4	Fiabilité.....	84
6.3.5	Module de réaction du sol K	85
6.4	Logiciel WinPas	85
6.5	Hypothèses et données de conception.....	86
6.5.1	Trafic	86
6.5.2	Viabilité	87
6.5.3	Infrastructure et fondation	87
6.5.4	Module de rupture du béton	89
6.5.5	Démarche de détermination de l'épaisseur de la dalle	89
6.6	Structures types	90
6.7	Dalles courtes goujonnées.....	93
6.7.1	Les joints	93
	Joints longitudinaux.....	93
	Joints transversaux.....	94
	Joints de désolidarisation.....	94
6.7.2	Construction des chaussées en béton.....	94
	Plan de pavage	94
	Préparation de la plate forme	95
	Installation des goujons et des tirants	95
	Préparation autour des structures d'utilités publiques	96
	Fourniture et transport du béton pour chaussée.....	96
	Mise en place	97
	Le sciage des joints.....	98
	Colmatage des joints.....	98
6.8	Conclusion	98
CHAPITRE 7 IMPACTS ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX		100
7.1	Introduction	100
7.2	Impact économique sur la collectivité	101
7.2.1	Impact sur l'administration.....	102
	Gain en temps et en coût d'investissement.....	103

7.2.2	Impact sur les usagers de la route	104
	Économie de coût de fonctionnement	104
7.2.3	Impact sur la société en général.....	105
7.3	Impact environnemental.....	105
7.4	Conclusion	106
	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	108
ANNEXE I	LOCALISATION DES RUES PAR CLASSES FONCTIONNELLES DANS L'AGGLOMÉRATION DE LONGUEUIL	111
ANNEXE II	RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DE L'ÉTAT DES CHAUSSÉES DU RÉSEAU ROUTIER DE LONGUEUIL	112
ANNEXE III	ÉTAT GLOBAL (OCI) (DONNÉES DÉCEMBRE 2003)	113
ANNEXE IV	ÉTAT VISUEL DE SURFACE (SÉLECTION DES DÉGRADATIONS SUR ARTÈRES PRINCIPALES)	114
ANNEXE V	CARACTÉRISATION DES SOLS, ARRONDISSEMENT DE VIEUX LONGUEUIL	115
ANNEXE VI	CARACTÉRISATION DES SOLS, ARRONDISSEMENT DE GREENFIELD PARK.....	120
ANNEXE VII	CARACTÉRISATION DES SOLS, ARRONDISSEMENT DE SAINT- HUBERT	122
ANNEXE VIII	TABLEAU DE CLASSIFICATION DES SOLS	124
ANNEXE IX	CARACTÉRISTIQUES S'APPLIQUANT AUX ROUTES ET AUX TERRAINS D'AVIATION	125
ANNEXE X	PROFONDEUR DU GEL ET LE NIVEAU DE LA NAPPE PHRÉATIQUE	126
ANNEXE XI	DONNÉES TRAFIC	127
ANNEXE XII	Mr EFFECTIF SELON LA MÉTHODE DU DOMMAGE ÉQUIVALENT (AASHTO 1993).....	128
ANNEXE XIII	DISTRIBUTION DES CAMIONS SUR DES ROUTES À VOIES MULTIPLES	129
ANNEXE XIV	DÉTAIL DE CALCUL DU LOGICIEL WIN-PAS.....	130

ANNEXE XV	CARTES DE CARACTÉRISATION DES SOLS DE LA VILLE DE LONGUEUIL	132
BIBLIOGRAPHIE.....		133

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 Méthodes de dimensionnement structural des chaussées les plus utilisées à travers le Canada.....	20
Tableau 3.1 Échelle d'évaluation des indices d'état.....	26
Tableau 3.2 Synthèse des données d'état.....	31
Tableau 3.2 État global (OCI) comparé 2003-2006.....	34
Tableau 3.2 Portance (durée de vie) comparée 2004-2006.....	35
Tableau 3.5 Tableau récapitulatif de la caractérisation des sols de Longueuil.....	40
Tableau 3.6 Caractérisation du trafic de la Ville de Longueuil	44
Tableau 4.1 Déviation normale en fonction du niveau de confiance.....	49
Tableau 4.2 Valeur des coefficients K_a et K_b en fonction du type de matériau.....	51
Tableau 4.3 Modèle de modules de résilience pour les matériaux de chaussées.....	52
Tableau 4.4 Pourcentage de la profondeur du gel.....	54
Tableau 5.1 Classe de sol support.....	64
Tableau 5.2 Données trafic selon la classification fonctionnelle.....	65
Tableau 5.3 Prescription pour les enrobés bitumineux.....	66
Tableau 5.4 Paramètre et hypothèse de conception pour les rues locales.....	69
Tableau 5.5 Structures types pour les rues locales	70
Tableau 5.6 Paramètre et hypothèse de conception pour les rues collectrices.....	72
Tableau 5.7 Structures types pour les rues collectrices.....	73
Tableau 5.8 Paramètre et hypothèse de conception pour les artères secondaires	75
Tableau 5.9 Structures types pour les artères secondaires.....	76

Tableau 5.10	Paramètre et hypothèse de conception pour les artères principales.....	78
Tableau 5.11	Structures types pour les artères principales.....	79
Tableau 6.1	Période d'analyse.....	84
Tableau 6.2	Classe de trafic.....	86
Tableau 6.3	Indice de viabilité.....	87
Tableau 6.4	Classe de sol support (révisé).....	88
Tableau 6.5	Structures types en béton de ciment	91

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1	9
Figure 2.2	9
Figure 2.3	11
Figure 2.4	12
Figure 2.5	14
Figure 2.6	17
Figure 2.7	18
Figure 2.8	23
Figure 2.9	24
Figure 3.1	27
Figure 3.2	28
Figure 3.3	29
Figure 3.4	30
Figure 3.5	35
Figure 3.6	45
Figure 4.1	50
Figure 4.2	54

Figure 4.3	Pénétration du gel et soulèvement.....	56
Figure 5.1	Station météorologique de Saint-Hubert	63
Figure 6.1	Interface pour le dimensionnement de chaussée rigide du logiciel WinPas....	90
Figure 7.1	Allocation des coûts aux usagers et à la collectivité.....	101

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AASHO	American Association of State Highway Officials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACPA	American Concrete Pavement Association
AIPCR	Association Internationale Permanente des Congrès de la Route
AQTR	Association Québécoise du Transport et des Routes
C-SHRP	Canadian Strategic Highway Research Program
CERIU	Centre d'Expertise et de Recherche en Infrastructures Urbaines
DJMA	Débit journalier moyen annuel (véhicule/j)
DTN	Daily Traffic Number
ÉCAS	Équivalent de charge axiale simple
FEC	Facteur d'équivalence des charges
FHWA	Federal Highway Administration
FWD	Falling Weight Deflectometer
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
IRI	Indice de rugosité internationale m/km
MG	Matériaux granulaires
MTQ	Ministère des transports du Québec
PL	Poids lourds
PCA	Portland Cement Association
PSI	Present Serviceability Index
WAPA	Washington Asphalt Pavement Association

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

C_d	Coefficient de drainage
E	Module d'élasticité (MPa)
I_L	Indice de liquidité
I_p	Indice de plasticité
J	Coefficient de transfert de charge aux joints
K	Module de réaction du sol support (MPa/m)
M_R	Module de résilience (MPa)
R	Fiabilité
S_0	Erreur standard
S_c	Module de rupture du béton (MPa)
SN	Nombre structural
SP	Potentiel de ségrégation
W_{18}	Nombre total admissible de passages d'essieux équivalant à un essieu simple à roues jumelées de 8,2t.
W_p	Limite de plasticité
W_L	Limite de liquidité
Z_R	Déviation normale
ε_c	Déformation en compression
ε_t	Déformation en traction
μ	Coefficient de Poisson
ω	Teneur en eau

INTRODUCTION

Le réseau routier est d'une importance stratégique. Il est essentiel au transport des marchandises et au déplacement de la population, il joue un rôle très important dans le développement socioéconomique de toute société et il représente un investissement qui se chiffre en centaines de millions de dollars.

Le réseau routier de la Ville de Longueuil s'étend sur près de 900 km, segmenté selon la classification fonctionnelle des chaussées en:

- 16,54 % d'artères;
- 13,20 % de collectrices;
- 70,26 % de rues locales.

En termes de vocation du territoire, cela représente :

- 7,41 % de rues industrielles;
- 14,17 % de rues commerciales;
- 76,80 % de rues résidentielles;
- 1,62 % de rues agricoles.

Les méthodes de dimensionnement structural des chaussées ne sont pas accessibles à tous les gestionnaires des réseaux routiers, c'est pourquoi, des pays et des Villes un peu partout dans le monde se dotent aujourd'hui d'un catalogue de dimensionnement des chaussées. Ces catalogues présentent les structures types les plus appropriées sur les plans, technique, économique et environnemental. Ces catalogues sont développés afin de permettre aux concepteurs de choisir très simplement et de manière pratique la structure d'une chaussée en fonction du trafic et du sol support.

Élaborer un catalogue spécifique à la voirie urbaine exige:

- la prise en compte des spécificités locales;

- la réutilisation des matériaux de la route elle-même ou des matériaux près de l'alignement;
- la simplification en limitant le nombre de structures possibles;
- le choix des grandes familles de matériaux utilisables suivant les disponibilités locales.

CHAPITRE 1

CONTEXTE

1.1 Problématique

La Ville de Longueuil est responsable de près de 900 km de routes, c'est une ville qui est sans cesse en extension et développement. Comme la plupart des municipalités québécoises, Longueuil a un réseau routier vieillissant, le plus souvent caractérisé par une structure de faible épaisseur avec un dispositif de drainage peu performant, ce qui rend la chaussée municipale fragile.

Depuis 2004, la Ville s'est dotée d'outils pour la gestion et la réhabilitation de ses infrastructures. Néanmoins, elle ne dispose pas d'outils en matière de dimensionnement structural des chaussées. Aussi, la volonté de construire un réseau routier durable a conduit la Ville de Longueuil à effectuer une démarche d'élaboration d'un catalogue de dimensionnement structural des chaussées qui est l'objet principal du présent projet de mémoire.

1.2 Objectif

L'objectif principal de ce mémoire est de développer un catalogue de dimensionnement structural des chaussées afin de permettre aux gestionnaires du réseau routier de choisir très simplement et de manière pratique la structure d'une chaussée en fonction du trafic et du sol support.

Les objectifs spécifiques de cet outil sont de fournir :

- une conception structurale pour résister aux charges;
- un dimensionnement au gel pour résister aux conditions climatiques du Québec.

1.3 Contraintes et limites

Force est d'admettre que ce catalogue ne pourrait couvrir tous les cas possibles qui pourraient se présenter à la Ville de Longueuil.

En effet, les catalogues de dimensionnement structural des chaussées ont toujours des limites dans leur utilisation. Il faut préciser que les catalogues s'appliquent à des cas typiques. Aussi, des études approfondies (géotechniques, trafic,) demeurent toujours requises dans les cas atypiques ou complexes. Il faut également préciser que le dimensionnement structural des chaussées ne tient pas compte des infrastructures souterraines.

Une autre contrainte est à l'effet que toute méthode de dimensionnement viscoélastique et viscoplastique de dimensionnement a été de facto éliminée, car les courbes de fatigue n'ont pas été développées pour le Québec et par conséquent, on s'est concentrés sur la méthode la plus couramment utilisée au Québec (AASHTO 93).

Il faut également préciser que nous avons pris par défaut les coûts fournis par le logiciel «Chaussée 2», car nous avons constatés qu'ils étaient sensiblement comparables au prix que nous avons à Longueuil et que tout les matériaux constituant la structure de la chaussée ont subi sensiblement la même évolution des coûts.

1.4 Envergure

L'intérêt de ce travail de recherche est d'ordre pratique. Le principal objectif est le développement d'un catalogue de dimensionnement structural des chaussées. Par conséquent, la connaissance de l'état du réseau routier s'imposait. À cet effet, les relevés et inspections combinés aux données d'inventaire répertoriées en 2004 sur le réseau routier de la Ville ont permis d'établir la spécificité de ce réseau et d'évaluer les besoins en dimensionnement structural des chaussées. De cet examen a découlé le besoin de connaître les sols supports des chaussées de Longueuil, ce qui a abouti à l'élaboration de cartes de caractérisation des sols sur tout le territoire de la Ville. Ainsi, l'aboutissement de ce travail est un catalogue qui

couvre les chaussées souples pour toutes les classes fonctionnelles et les chaussées rigides pour les chaussées fortement sollicitées.

1.5 Étapes et méthodologie

Les étapes pour l’élaboration du catalogue de dimensionnement structural des chaussées sont présentées ci-dessous par chapitre.

Le chapitre deux présente brièvement le concept des structures de chaussée, les types de chaussées, les sollicitations et les méthodes de dimensionnement structural des chaussées les plus utilisées de nos jours, soit la méthode empirique et la méthode mécaniste empirique. Ce chapitre présente également les particularités de la chaussée municipale avec un rappel des effets des cycles gel-dégel sur la chaussée dans le contexte climatique québécois. Ce chapitre repose sur une revue documentaire exhaustive.

Le chapitre trois liste les caractéristiques spécifiques du réseau routier et des chaussées de la Ville de Longueuil ainsi que les besoins en dimensionnement structural. On y aborde en effet l’exploitation des résultats des études externes réalisées depuis 2002 pour la réalisation de l’inventaire des infrastructures municipales et d’autres mandats externes, tels que comptages routiers, pour la classification fonctionnelle du réseau. Ce chapitre présente également l’exploitation et le traitement des études géotechniques pour définition des caractéristiques des sols sur tout le territoire de Longueuil. Finalement, un arbre décisionnel est présenté pour faciliter le choix du type de structure (souple ou rigide) pour l’élaboration du catalogue. Ce chapitre repose sur une recherche interne de documentation et de synthèse.

Le chapitre quatre présente la méthodologie de dimensionnement structural retenue pour l’élaboration du catalogue pour chaussées souples, à savoir l’adaptation de la méthode AASHTO (empirique 1993) par le MTQ pour le dimensionnement structural des chaussées souples (logiciel Chaussée 2). Ce chapitre repose sur une analyse multicritère basée sur une consultation interne auprès des ingénieurs de la Direction du génie.

Le chapitre cinq présente les étapes de développement du catalogue de dimensionnement structural des chaussées souples. Le catalogue sera présenté sous forme de fiches faciles à utiliser, où l'on trouve des structures de chaussée proposées selon la nature du sol support et la classification fonctionnelle de la section de chaussée. Ce chapitre repose sur des analyses structurales et des analyses au gel.

Le chapitre six est centré sur les étapes du développement du catalogue de dimensionnement structural des chaussées rigides pour les cas particuliers que sont les chaussées fortement sollicitées par les véhicules lourds. Le logiciel *WinPAS* est utilisé pour le calcul structural et le logiciel «Chaussée 2», pour la détermination des épaisseurs requises pour la protection contre le gel. Tout comme pour le catalogue des chaussées souples, celui des chaussées rigides sera présenté sous forme de fiches faciles à utiliser, où l'on trouve des structures de chaussée proposées selon la nature du sol support et la classe du trafic.

Le chapitre sept traite des impacts économique et environnemental du projet de catalogue de dimensionnement structural des chaussées pour la Ville de Longueuil.

CHAPITRE 2

LES CHAUSSÉES ET LE DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL

2.1 Chaussée

« On appelle chaussée toute surface spécialement aménagée, sur un sol ou un ouvrage, pour le stationnement ou la circulation des personnes et des véhicules. » (Jeuffroy, 1983, p. 1).

Lorsque les besoins du trafic le justifient, la chaussée permet la circulation en toute saison. Elle a l'avantage d'offrir des surfaces unies, peu bruyantes, confortables et sécuritaires. D'après Jeuffroy (1983), concevoir une chaussée c'est à la fois décider de la nature et de l'épaisseur des couches successives à réaliser et exiger des matériaux avec des caractéristiques bien définies pour répondre aux normes requises. Il est donc nécessaire de connaître :

- les charges roulantes que la chaussée doit supporter et leurs effets destructeurs ;
- les types de chaussées, souples ou rigides, qui pourront résister à ces charges.

Concevoir une chaussée, exige également une expertise dans la réalisation adéquate des couches constitutantes de la structure des chaussées, car la mise en œuvre et la construction sont indispensables pour avoir des routes durables.

2.1.1 Structure de chaussée

Constitution d'une structure de chaussée

Le dictionnaire de l'AIPCR définit la structure de chaussée comme « l'ensemble des couches construites au-dessus de la couche de forme ». Une structure de chaussée est aussi synonyme de corps de chaussée ou de superstructure.

Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini (LCPC, 1994), tel que montré à la figure 2.1.

La plate-forme support de chaussée est constituée du sol support. Elle est généralement surmontée d'une couche de forme qui remplit une double fonction. Pendant les travaux, elle assure la protection du sol support et la qualité du nivellement et elle permet la circulation des engins. En service, elle permet l'homogénéisation des caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le sol ou le remblai et l'amélioration de la portance à long terme. Constituée principalement de sable, la couche de forme assure également une protection de la fondation inférieure contre la contamination ou la remontée des matériaux fins du sol lorsque celui-ci en présente une proportion élevée.

La couche d'assise est généralement formée de la couche de fondation surmontée de la couche de base. Elle apporte à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic et répartit les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible.

La couche de surface est constituée d'une couche de roulement reposant éventuellement sur une couche de liaison intermédiaire. La couche de surface assure la protection des couches d'assise contre les infiltrations d'eau et garantit la sécurité et le confort des usagers.

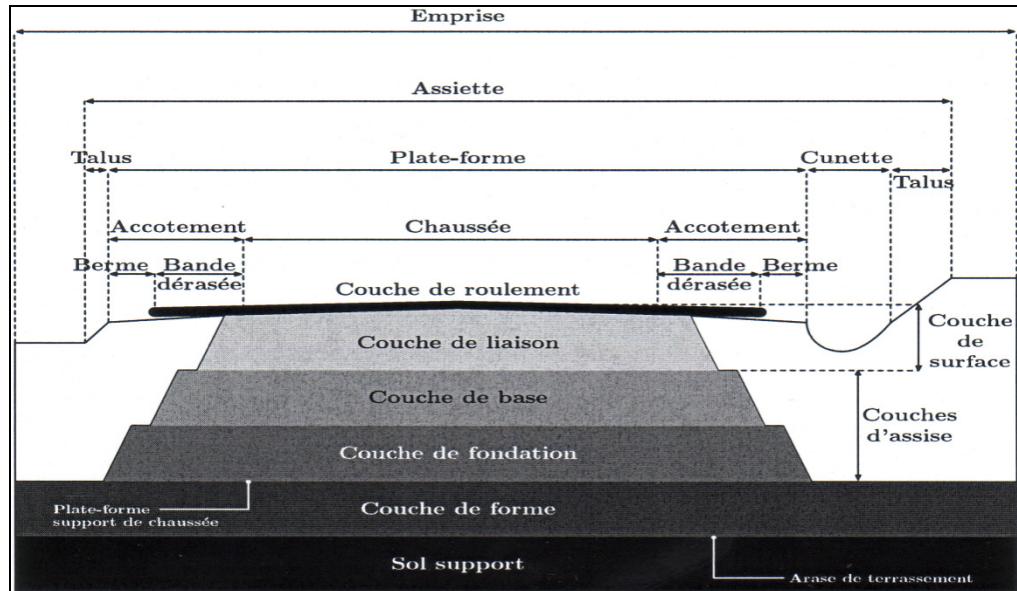


Figure 2.1 Coupe transversale d'une chaussée.
Tirée du guide technique (LCPC, 1994)

2.1.2 Les différents types de structures de chaussée

On distingue trois principaux types de chaussées: les chaussées souples, les chaussées rigides et les chaussées mixtes.

Les deux premiers types sont des chaussées classiques (*Voir figure 2.2*), il est apparu par la suite le type de chaussées mixtes, tel que la majorité des rues de la Ville de Montréal.

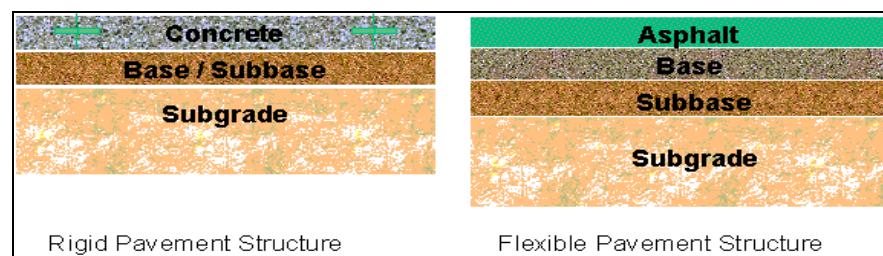


Figure 2.2 Les deux types de chaussées classiques.
Tirée de WAPA (2008, Web)

Les chaussées souples ont une structure flexible en raison des couches granulaires successives qui les constituent ainsi que de la couche de revêtement bitumineux (béton bitumineux ou enduit superficiel) qui la recouvre.

Plusieurs catégories de chaussées souples sont identifiées. En plus de la chaussée classique ou conventionnelle (Haas, 1997), on distingue:

- les chaussées souples pleine profondeur, aussi appelées chaussées souples toute épaisseur, qui regroupent les structures où les mélanges bitumineux, employés pour toutes les couches au-dessus du sol support, à l'exception d'une couche de forme (de nivellement) granulaire drainante posée sur l'infrastructure (sol support);
- les chaussées souples profondes, aussi appelées chaussées souples grande épaisseur, qui regroupent les structures où le revêtement et la couche de fondation sont en enrobé bitumineux.

Au passage des charges roulantes, les chaussées souples se déforment. Il se forme alors une dépression de petites dimensions et une flèche relativement importante. « Pour diffuser ces pressions et réduire la valeur maximum sur l'axe de charge, il faut augmenter l'épaisseur de chaussée. Ces constatations sont à la base de toutes les méthodes de calcul des chaussées souples qui relient l'épaisseur requise à la pression maximale admissible sur le sol, pour une charge donnée. » (Jeuffroy, 1983, p. 254)

Chacune des couches constituant la chaussée souple doit remplir un rôle dans la structure. Ainsi, les revêtements bitumineux doivent être étanches pour protéger contre les infiltrations d'eau, les différentes couches constituées de matériaux granulaires. Ils doivent résister aux efforts générés par les pneumatiques sur la surface de roulement; efforts normaux et tangentiels. Quant à la couche de base et la couche de fondation, elles doivent assurer la transmission des charges sans se déformer, se dégrader ou s'écraser.

Les chaussées rigides sont des chaussées en béton de ciment. Elles sont constituées d'une couche de base en béton de ciment, qui sert aussi de couche de roulement, et qui repose sur

une couche de fondation en matériau granulaire drainant ou en matériau traité aux liants hydrauliques ou en béton maigre. Contrairement aux enrobés bitumineux, les dalles en béton supportent largement les efforts dus aux charges. Ainsi, les problèmes d'étanchéité et d'infiltration d'eau vers les couches sous-jacentes ne se posent pas. Par contre, il est important de mettre une couche de fondation en matériau granulaire pour :

- contrôler l'action du gel en assurant le drainage et en contrôlant le retrait et le gonflement de certains sols et améliorer la capacité portante du sol support (plate-forme) durant la construction;
- contrôler le phénomène de pompage.

Comme le montre la figure 2.3, la pression sous la dalle en béton au passage des charges roulantes est largement répartie et la déformation qui en résulte est faible et très étalée. Toutefois, bien que les pressions au sol ne soient pas dangereuses, les flexions dans la dalle peuvent provoquer sa rupture si l'épaisseur est insuffisante. Par conséquent, les méthodes de calcul de chaussées rigides combinent l'épaisseur et la résistance du béton des dalles pour une charge et un sol donnés (Jeuffroy, 1983).

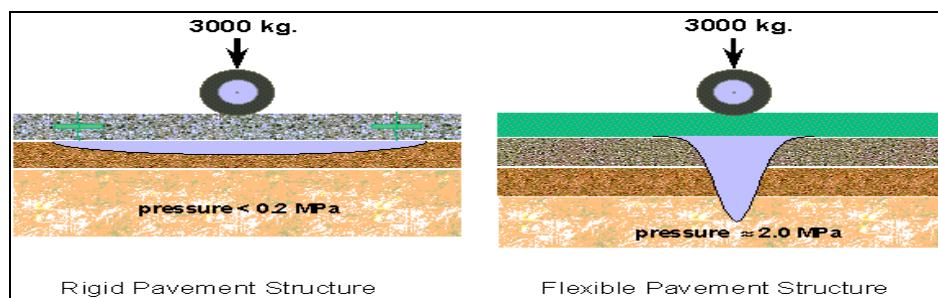


Figure 2.3 Distribution des charges pour les deux types de structure classique des chaussées.

Tirée de WAPA (2008, Web)

Il existe plusieurs catégories de chaussées rigides (Huang, 1993) (*Voir figure 2.4*):

- dalles courtes en béton, avec ou sans goujons au droit des joints transversaux, et avec tirants au droit des joints longitudinaux;

- dalle continue en béton armé longitudinalement et transversalement, avec goujons au droit des joints transversaux et tirants au droit des joints longitudinaux;
- dalle continue en béton armé longitudinalement et transversalement, avec des tirants au droit des joints longitudinaux;
- dalle continue en béton armé longitudinalement avec tirants au droit des joints longitudinaux.

Pour les différents types de dalle, les goujons barres d'acier rondes lisses sont répartis entre les joints de façon à unir les dalles adjacentes et à transmettre les efforts de cisaillement. Les tirants qui sont des barres d'acier profilées, sont répartis le long des joints longitudinaux et ils sont destinés à reprendre les efforts de traction entre les joints des dalles adjacentes.

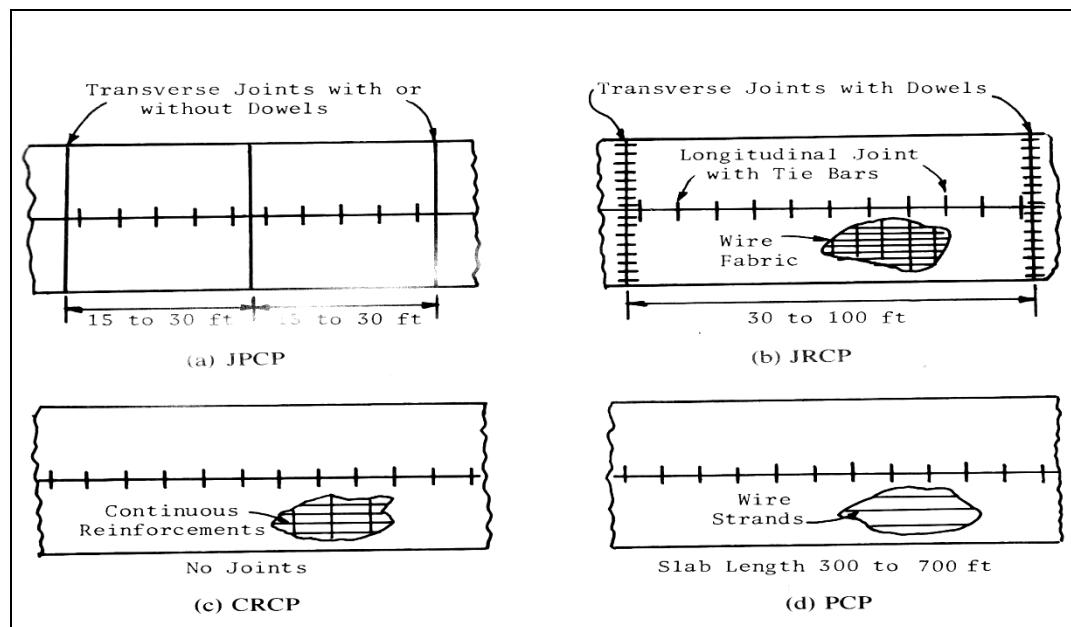


Figure 2.4 Les quatre types de chaussées rigides.

Tirée de Huang (1993, p. 17)

Le béton compacté au rouleau (BCR) est un béton de consistance sèche et n'est pas armé, car sa résistance en traction est de plus de 50% supérieure à celle d'un béton conventionnel, le rendant ainsi moins vulnérable à une corrosion des aciers. Il est sans affaissement, car il est formulé avec un tiers moins d'eau, ce qui le rend moins sensible au retrait hydrique que ne

l'est le béton conventionnel. Sa mise en œuvre se fait sans coffrage, ce qui le rend plus conventionnel. Il est transporté et mis en place avec des équipements traditionnels de construction de chaussée (paveuse, ...) et densifié avec un compacteur cylindrique. Les constituants de base d'un BCR sont les mêmes que ceux d'un béton conventionnel, on retrouve le ciment, l'eau et les granulats, mais avec des teneurs réduites en ciment et en eau (Assaf, 2005). Les chaussées en BCR sont des chaussées rigides qui présentent un comportement structural identique aux chaussées en béton conventionnel et sont soumises aux mêmes critères de conception.

Le BCR est principalement utilisé pour les chaussées à usage industriel et pour les chaussées destinées à supporter un trafic lourd. Le principal problème du BCR est une surface moins uniforme (uni élevé), problème qui peut être résolu :

- en utilisant un granulat plus fin;
- en ayant recours à une paveuse à très haute densité de compactage post-épandage, diminuant ainsi les ondulations;
- en procédant au fraisage de la surface.

L'application des chaussées en béton de ciment dans le domaine municipal est justifiée aux endroits avec de forts volumes de circulation, qui sont le plus souvent sujets à l'orniérage (effet de fatigue et déformation permanente) favorisé par le trafic à basse vitesse et les arrêts fréquents. Ainsi, les chaussées rigides sont requises dans les zones industrielles, les réseaux artériels, aux intersections et carrefours (giratoire), sur les voies d'autobus et aux arrêts d'autobus.

Les chaussées mixtes ou hybrides, sont généralement constituées, d'une couche supérieure présentant cohésion et rigidité. Ces couches de bases rigides sont souvent des graves stabilisées au bitume ou au ciment ou au béton très peu dosé. Ainsi, ces couches sont plus flexibles que les bétons classiques, mais moins résistantes. « Ces chaussées doivent satisfaire à la fois aux règles de conception des chaussées souples et des chaussées rigides. » (Jeuffroy, 1983, p. 255)

2.2 Le dimensionnement structural des chaussées

Une superstructure de chaussée doit résister à diverses sollicitations, notamment celles dues au trafic et doit assurer la diffusion des efforts induits par ce même trafic dans le sol support. Le dimensionnement de la structure de la chaussée dépend donc principalement de deux données fondamentales qui sont le trafic et la capacité portante du sol. Ces deux données sont les paramètres de base pour le dimensionnement structural, ils interviennent aux deux interfaces de la structure de chaussée; en surface pour le trafic et à la base pour le sol, ce qui nous rappelle le rôle distinct que doivent jouer les diverses couches d'une chaussée. En général, on peut conclure que les couches supérieures, outre leur fonction de confort et de sécurité, assurent la diffusion des efforts de trafic, alors que la partie inférieure doit assurer une portance permettant la transmission de ces efforts dans le sol de fondation. En résumé, le dimensionnement des couches supérieures est principalement lié à l'intensité du trafic, tandis que celui des couches inférieures dépend principalement de la qualité du sol support (Jeuffroy, 1983).

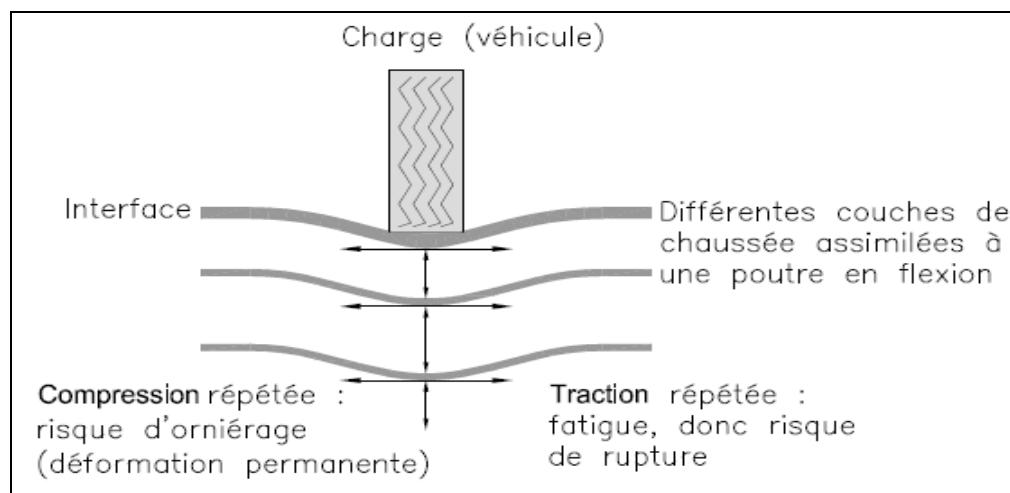


Figure 2.5 Schéma de fonctionnement d'une structure de chaussée sous l'application d'une charge roulante.

Tirée de Perret (2003, p. 6)

Comme le montre la figure 2.5, l'application d'une charge roulante induit une déformation en flexion des couches de la structure de la chaussée. Cette flexion entraîne des sollicitations de traction à la base des couches de revêtement.

Il existe différentes méthodes théoriques de dimensionnement structural pour bien anticiper cette déformation. Elles donnent lieu ensuite à différents modèles mathématiques de dimensionnement théorique des structures de chaussée.

2.2.1 Dimensionnement théorique des structures de chaussées souples

Méthodes empiriques

Les méthodes empiriques font appel exclusivement à des expériences comparant le comportement à long terme de diverses structures pour des trafics, des conditions climatiques et des sols supports variés. Ainsi, on observe sous trafic des chaussées expérimentales à grandeur réelles. Ces essais permettent de recueillir l'information pour établir et mettre en place les règles empiriques de dimensionnement structural.

La démarche consiste à fixer un critère pour définir la durée de vie d'une chaussée. On établit sur cette population de sections expérimentales, en général par la méthode statistique de régression multiple, des relations entre cette durée de vie et l'épaisseur des couches ainsi que les propriétés mécaniques des matériaux ou entre la durée de vie et une mesure globale des propriétés mécaniques de la structure de chaussée et du sol support.

Parmi les essais expérimentaux qui ont marqué le dimensionnement structural des chaussées, on retrouve les essais américains du WASHO (*Washington Association of State Highway Officials*) en 1952, les essais de la AASHO (*American Association of State Highway Officials*) de 1952 à 1954, et les essais britanniques à Borough Bridge en 1949 et à Alconbury Hill en 1957.

La méthode de l'AASHO a consisté en la construction de circuits avec des chaussées de types variés qui ont été soumises à un trafic contrôlé. Puis un constat a été fait sur les performances des divers types de chaussées. L'essai portait sur 240 sections de chaussées souples, 271 de chaussées rigides et une cinquantaine de sections de chaussées souples avec base stabilisée (Jeuffroy, 1983).

D'après G. Jeuffroy (1983), la méthode de l'AASHO, est l'une des plus séduisantes et constitue l'essai le plus important jamais effectué pour confronter les idées et les faits en matière de technique routière. Jeuffroy ajoute que « ces essais dont les résultats ont été publiés par le *Highway Research Board* constituent une source extrêmement intéressante de renseignements de toutes sortes. » (Jeuffroy, 1983, p. 302)

En effet, beaucoup de méthodes se sont inspirées de la méthode AASHO et elle reste la base pour la plupart des méthodes de dimensionnement structural actuelles. On retrouve, entre autres, la méthode empirique suisse.

Méthodes mécanistes-empiriques

Les méthodes mécanistes-empiriques font appel à une approche analytique complétée par des données empiriques, comme décrites dans *Pavement Analysis and Design* (Huang, 1993). Elles procèdent généralement en deux étapes :

- la détermination des sollicitations dans une superstructure sous l'effet d'une charge définie de trafic; ont recours au modèle de charges de référence;
- la mise en relation de ces sollicitations avec certaines dégradations des chaussées; ont recours aux modèles de comportement des matériaux, soit les modèles de calcul (ou de réponses) et les modèles de performance.

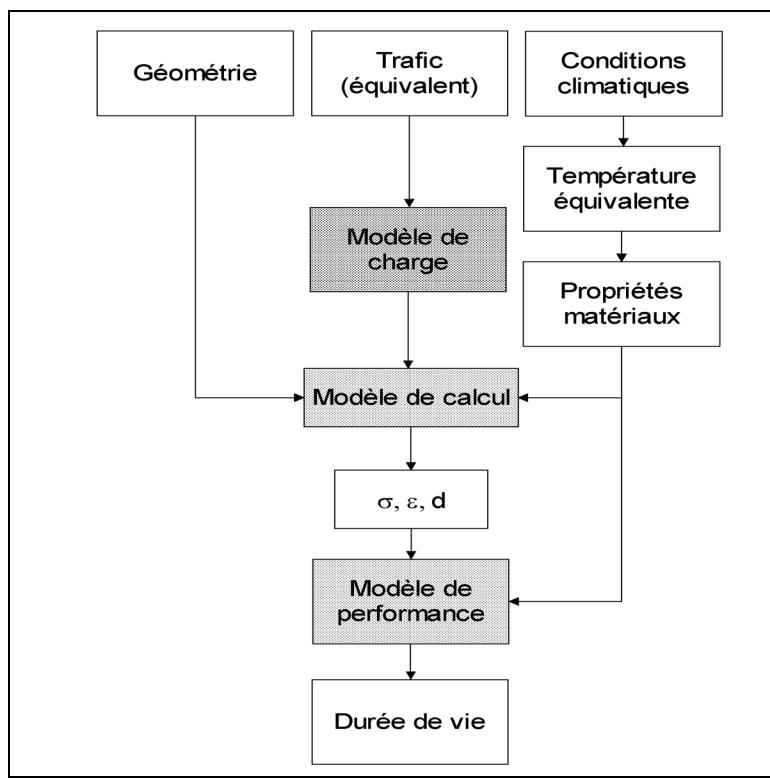


Figure 2.6 Schéma de fonctionnement d'une méthode mécaniste-empirique de dimensionnement structural.

Tirée de Perret (2003, p. 12)

La méthode française de dimensionnement des structures de chaussée est une méthode mécaniste-empirique. La figure 2.6 illustre le principe de fonctionnement des méthodes mécaniste-empirique de dimensionnement.

Méthode incrémentale

En vue de limiter, voire supprimer, l'importance des données empiriques dans le domaine du dimensionnement structural des chaussées routières, une nouvelle méthode veut voir le jour en Europe : la méthode incrémentale. Cette méthode en projet (COST-333, 1999) vise à étudier l'évolution d'une chaussée dans le temps (t) en cumulant l'effet, ou le dommage (D), de chacune des sollicitations dues aux charges de trafic (Perret, 2003). La figure 2.7 présente le principe de fonctionnement de la méthode incrémentale.

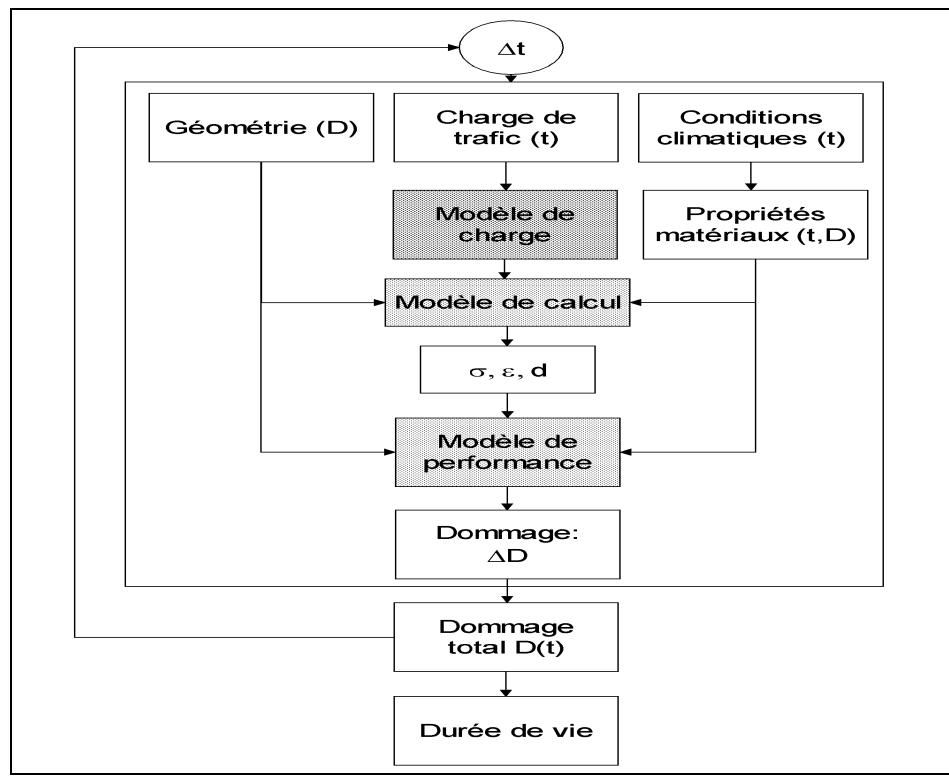


Figure 2.7 Schéma de fonctionnement d'une méthode incrémentale de dimensionnement structural.

Tirée de Perret (2003, p. 13)

Elle prévoit tenir compte de l'effet des sollicitations sur l'état de la chaussée (géométrie) et sur l'évolution des propriétés des matériaux en fonction du dommage subi. Elle doit aussi intégrer l'effet des variations de la température et des données réelles de trafic sans avoir recours à la notion de trafic équivalent (Perret, 2003).

2.3 Revue bibliographique des méthodes de dimensionnement structural des chaussées

2.3.1 Villes en Amérique du Nord

Il ressort de la revue documentaire que les méthodes de dimensionnement structural des chaussées les plus utilisées en Amérique du Nord, selon le type de chaussées, sont:

- la méthode AASHTO 1993 (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) et la méthode AI (*Asphalt Institute*) pour le dimensionnement structural des chaussées souples;
- la méthode AASHTO et la méthode PCA (*Portland Cement Association*) pour le dimensionnement structural des chaussées rigides.

2.3.2 Au Canada

À la différence de FHWA (*Federal Highway Administration*) aux États-Unis, il n'y a pas une administration unique responsable pour établir au Canada un standard en matière de dimensionnement structural des chaussées et pour assurer le financement de la construction et de la réhabilitation du réseau routier.

La conception du réseau routier principal est sous la juridiction des gouvernements provinciaux alors que le gouvernement fédéral est responsable du réseau routier appartenant aux parcs nationaux (*National Parks Roadway*), aux ports, aéroports, ponts et autres chaussées spécifiques.

Chaque administration, provinciale ou municipale, est libre d'utiliser la méthode de son choix pour la conception et la réhabilitation des chaussées. Un résumé des méthodes généralement utilisées pour la conception des chaussées par les provinces et le gouvernement fédéral au Canada, est présenté dans le rapport technique du C-SHRP d'avril 2002 (C-SHRP, 2002). Il ressort de ce rapport que la majorité des administrations canadiennes utilise la méthode AASHTO comme outil de conception ou comme moyen de vérification si une autre méthode alternative a été utilisée. Le tableau 2.1 résume les méthodes utilisées par les administrations canadiennes pour le dimensionnement structural des chaussées souples et des chaussées rigides.

Tableau 2.1 Méthodes de dimensionnement structural des chaussées les plus utilisées à travers le Canada
Adapté de C-SHRP (2002)

Administrations	Conception de chaussées souples		Conception de chaussées rigides	
	Méthodes généralement utilisées	Période nouvelle / réhabilitation (année)	Méthodes généralement utilisées	Période nouvelle / réhabilitation (année)
Colombie-Britannique	AASHTO 93	20	Non Appliquées (N/A)	---
Alberta	AASHTO 93	20	N/A	---
Saskatchewan	Shell, Asphalt Institute	15	N/A	---
Manitoba	AASHTO 93 nouvelles constructions, Asphalt Institute réhabilitation	20	AASHTO 93	20
Ontario	AASHTO 93, Asphalt Institute	20	AASHTO 93, PCA, section standard	30
Québec	AASHTO 93	15-20	AASHTO 93, PCA	30
Nouveau-Brunswick	AASHTO 93	20	N/A	---
Île-du-Prince-Édouard	Asphalt Institute	20	N/A	---
Nouvelle-Écosse	AASHTO 93, méthode propre	20	AASHTO 93	25
Terre-Neuve	Section standard	-	N/A	---
Gouvernement fédéral	AASHTO 93	20	N/A	---

2.4 Particularité des chaussées municipales

La chaussée, qu'elle soit municipale ou autoroutière, a la même fonction : répartir les charges de circulation sur le sol support. La différence réside dans l'adaptation au milieu. Ces différences sont bien présentées par le CERIU dans ces classeurs (CERIU, 2002) et se résument comme suit.

2.4.1 Types de chaussées municipales

Les chaussées municipales sont généralement de type souple, qu'elles soient de type urbain où les trottoirs et les bordures délimitent la chaussée, ou encore de type rural où les fossés et les accotements bordent la chaussée. On trouve quelques structures mixtes dans les grands centres urbains, comme Montréal, et très peu de chaussées rigides. Une partie importante des chaussées municipales à faible trafic est caractérisée par une structure de faible épaisseur avec un dispositif de drainage peu performant et même, dans certains cas, inexistant. Par conséquent, la structure de la chaussée est fragile.

2.4.2 Environnement et contraintes

La chaussée municipale abrite diverses infrastructures appartenant à différentes administrations. Ainsi, on retrouve, généralement sous la chaussée, le réseau d'égout, d'aqueducs, d'éclairage, de communication et d'énergie. Ce qui inclut, les cadres, les couvercles et d'autres accessoires qui émergent en surface. Cette cohabitation constitue des contraintes d'environnement qui rendent la gestion de ces infrastructures (entretien et réparation) difficile et coûteuse, souvent reportée d'année, en année ce qui contribue à en réduire la durée de vie. Les réparations de certaines sections de ces infrastructures souterraines ou même les installations nouvelles dans la chaussée existante sont à l'origine de nombreuses coupes et excavations, ce qui engendre l'apparition de fissures (joints de pavage) et de comportement différentiel (tranchée et chaussée existante). On doit également ajouter le problème de drainage de l'eau en surface dû au profil de rue existant qui est fonction des trottoirs, bordures et autres infrastructures existantes avec lesquelles il faut composer lors de l'intervention. Tout cela limite les techniques d'intervention et contribue à augmenter les coûts d'entretien, ce qui pousse les municipalités à reporter les travaux. On contribue ainsi à exploiter sans entretien les chaussées jusqu'à la limite ultime de leur durée de vie, ce qui limite généralement les choix d'intervention à la reconstruction complète.

2.4.3 Sollicitations

Les conditions de sollicitation sont assez particulières pour la chaussée municipale car en plus de la grande variété du type de trafic qu'elle supporte, il y a la présence de circuits d'autobus urbains. La difficulté d'implanter et d'appliquer la réglementation visant les limitations de charges durant la période de dégel contribue à l'agressivité du trafic sur certaines chaussées municipales. De plus, les véhicules lourds, particulièrement les autobus, circulent à basse vitesse, ce qui augmente significativement la déformation et la détérioration des chaussées souples. Bien entendu, les chaussées municipales, comme les chaussées autoroutières, subissent les conditions climatiques du Québec, ce qui rend le maintien de la bonne condition des chaussées très difficile. En effet, les précipitations importantes, l'indice de gel élevé, ainsi que le nombre grandissant de cycles de gel-dégel nécessitent une adaptation particulière des techniques de conception, de construction et de réhabilitation de la chaussée municipale.

2.5 Phénomène de dégradation des chaussées dûe au gel et au dégel

L'exploitation des chaussées durant l'hiver, engendre la dégradation de la surface. La période la plus critique de la vie des chaussées est la période du dégel printanier.

Pendant l'hiver, la formation de lentilles de glace dans le sol gélif s'accompagne de soulèvements de la surface, ce qui provoque la formation des lézardes et des fissures généralement longitudinales comme montrées à la figure 2.8. Ces fissures rendent le revêtement bitumineux moins étanche et donc la pénétration d'eau dans la fondation a pour effet d'accélérer la dégradation de la surface.

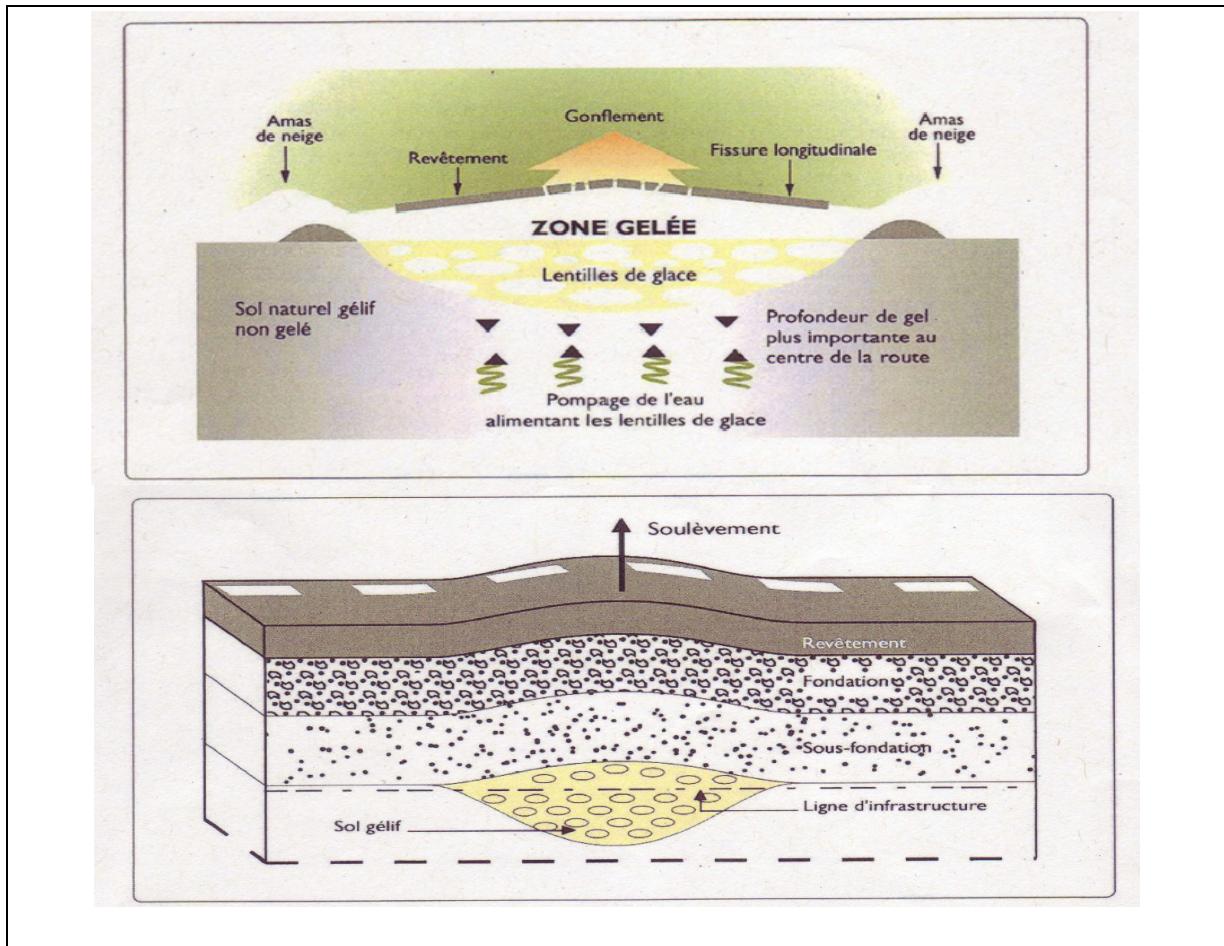


Figure 2.8 Effet du gel généralisé relié aux matériaux susceptibles au gel composant la sous fondation ou l'infrastructure.

Tirée de l'AQTR (2010, chapitre V, p. 5)

En période de dégel, le revêtement de la surface de roulement est supporté par une fondation partiellement dégelée et saturée d'eau, donc de faible portance, le tout reposant sur une couche gelée rigide et imperméable, comme le montre la figure 2.9. L'eau contenue dans cet horizon de matériaux dégelé sera pompée vers la surface au passage du trafic. Cette situation est à l'origine de formation de nids-de-poule dans les revêtements de chaussée.

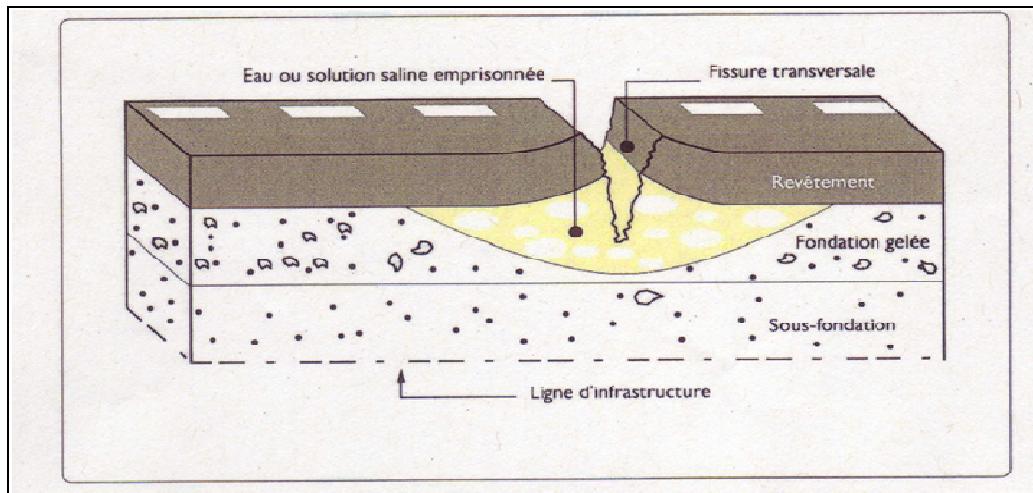


Figure 2.9 Effet du gel localisé relié aux matériaux susceptibles au gel situés près de la surface du revêtement.

Tirée de l'AQTR (2010, chapitre V, p. 6)

Le problème se présente aussi lorsque la fondation est entièrement dégelée et non drainée. L'eau reste confinée dans l'assiette de rue, étant donné que le sol support est déjà saturé par l'eau de fonte de lentilles de glace. Ce phénomène a pour effet d'augmenter la sollicitation en fatigue du revêtement d'où l'apparition de dégradations majeures (fissurations de fatigue, carrelage,...) (Blond et al, 2000).

2.6 Conclusion

La volonté de construire un réseau routier durable a conduit la Ville de Longueuil à effectuer une démarche de réalisation d'un catalogue de dimensionnement structural des chaussées. La Ville de Longueuil veut ainsi adopter une stratégie d'investissements et d'entretien afin d'avoir un niveau de service élevé et une bonne performance de son réseau routier.

Dans ce qui suit, est présentée la démarche pour la réalisation du catalogue qui tient compte des particularités de la chaussée municipale de Longueuil et des conditions climatiques du Québec.

CHAPITRE 3

CONTEXTE SPÉCIFIQUE DE LONGUEUIL ET BESOIN EN DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL DES CHAUSSÉES

3.1 Introduction et mise en situation

La Ville de Longueuil par sa situation géographique stratégique, possède un fort potentiel de développement économique. La Ville est située en bordure du fleuve Saint-Laurent, au cœur de la région métropolitaine et à proximité du centre-ville de Montréal. Elle se trouve à la croisée d'autoroutes qui mènent aux États-Unis et dans l'est du Canada.

La Ville de Longueuil est formée de trois arrondissements : Greenfield Park, Saint-Hubert et Vieux-Longueuil. Elle est la Ville centre d'une agglomération qui comprend les villes de Boucherville, Brossard, Saint-Lambert et Saint-Bruno-de-Montarville. Le territoire de la Ville de Longueuil couvre une superficie de 116 km² et est traversée par d'importantes infrastructures routières, soit :

- Les autoroutes 10, 15, 20 et 30.
- Les routes 112 (boulevard Cousineau), 116, 132, et 134 (boulevard Taschereau).

Elle comprend aussi un réseau ferroviaire et un aéroport. Localement, Longueuil est desservie par un réseau de boulevards et de grandes artères qui permettent une circulation fluide sur l'ensemble du territoire de la ville-centre et de l'agglomération (*Voir annexe I*, p. 110). L'agglomération de Longueuil est desservie par un réseau de transport en commun comportant près de 70 lignes d'autobus comprenant plus de 3 000 arrêts, et une station de métro.

La Ville de Longueuil est l'une des premières villes au Québec à se doter d'un programme d'inventaire et d'entretien des infrastructures urbaines. Ce programme a été réalisé par le consortium Dessau-Soprin/Groupe SM, salué par le ministère des Affaires municipales et des

Régions et de l'Occupation du territoire du Québec qui lui a décerné le prix d'innovation technologique 2004.

Les relevés et inspections combinées aux données d'inventaire répertoriées sur les divers réseaux ont permis d'établir une cote d'état de chaque infrastructure. Le constat général quant à l'état du réseau routier ainsi que les recommandations qui en découlent à la lumière de ce programme sont présentés ci-dessous.

3.2 Description des caractéristiques du réseau routier de la Ville de Longueuil

3.2.1 Résultats de l'évaluation de l'état du réseau routier

Les résultats de l'évaluation de l'état du réseau sont résumés dans le tableau joint en annexe II (p. 111), il est traduit par les figures suivantes selon l'état visuel de surface, le confort au roulement et la portance (PCI, uni, portance). L'échelle d'évaluation des indices correspondants à chaque état est présentée au tableau 3.1.

Tableau 3.1 Échelle d'évaluation des indices d'état
Tiré de Consortium (2004, p. 6-40)

Valeur de l'échelle générale	Appréciation descriptive	Indice PCI	Uni (mesure IRI)	Portance (durée de vie, années)	Indice global OCI
100	Très bon	100	0	50	100
80	Bon	80	2.0	20	80
60	Passable	60	4.0	10	60
40	Faible	40	8.0	5	40
20	Très faible	20	10.0	2	20
0		0	15.0	0	0

État visuel de la surface (indice PCI)

L'état de la surface est évalué suivant la norme ASTM D-6433-99 adaptée par l'ajout de certains types de dégradations spécifiques au milieu municipal.

On observe que l'indice d'état de surface sur l'ensemble du territoire se classe parmi les plages «très bon» et «bon» (Voir figure 3.1).

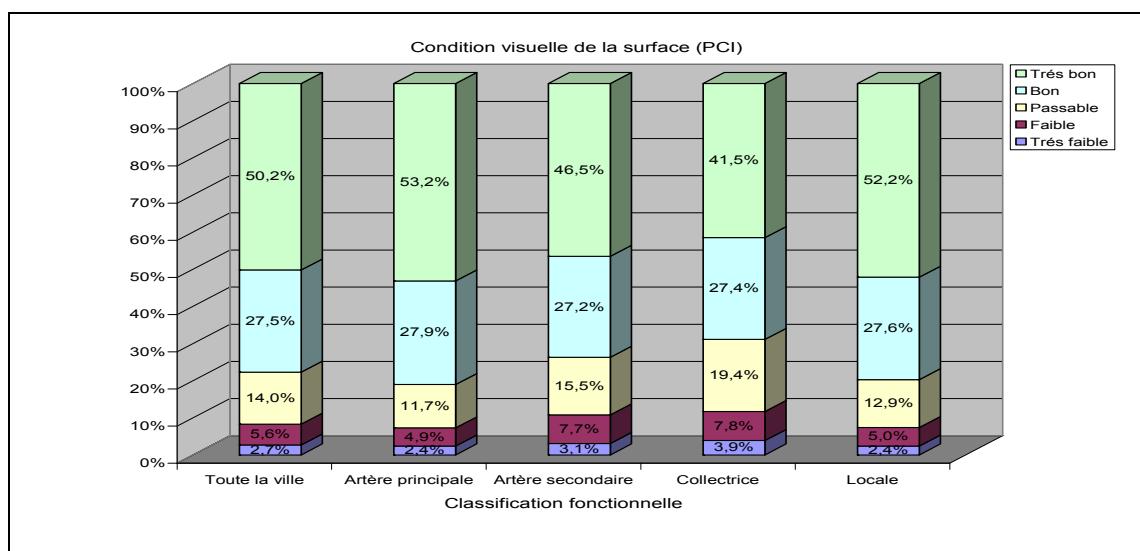


Figure 3.1 État visuel de la surface.
Adaptée de Consortium (2004, p. 7-3)

Confort au roulement (indice d'uni)

Le confort au roulement est évalué à l'aide d'un profilomètre inertiel laser (tous les 3 m), sur toutes les artères et les collectrices de la Ville et sur près de 0,8 % des rues locales soumises aux passages des autobus.

De façon générale, on constate que l'indice de confort au roulement se situe majoritairement dans les classes « passable » à « faible » sur l'ensemble du réseau routier de la Ville indépendamment de la classe de chaussée (*Voir figure 3.2*).

Cette déficience d'uni est principalement attribuable, dans le cas du réseau supérieur (artères et collectrices) aux fissures en trace de roues causées par la rupture structurale du revêtement sous l'action du passage des véhicules lourds. Cette cause est également, en partie, à l'origine de la déficience d'uni des chaussées locales soumises aux passages des autobus, combinée à la présence de rapiéçages des coupes et tranchées.

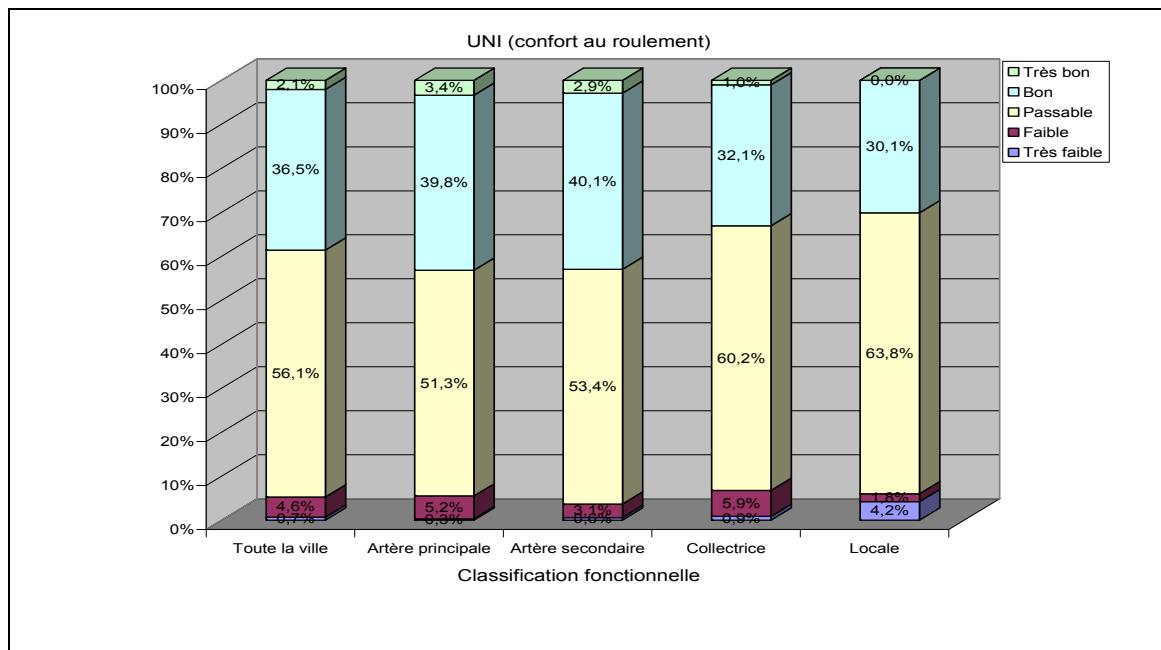


Figure 3.2 Confort au roulement.
Adaptée de Consortium (2004, p.7-6)

Analyse structurale (indice de portance)

L'analyse structurale est évaluée à l'aide d'un deflectomètre à masse tombante FWD (à tous les 75 m) sur toutes les artères et collectrices et sur près de 1,4 % des rues locales soumises aux passages des autobus.

On constate que l'indice de portance se situe dans les plages « faible » à « très faible » sur 32 % du réseau de la Ville. Ce qui se présente dans des proportions plus importantes sur les artères secondaires soit 38 % et sur les artères principales soit 41 % (Voir figure 3.3).

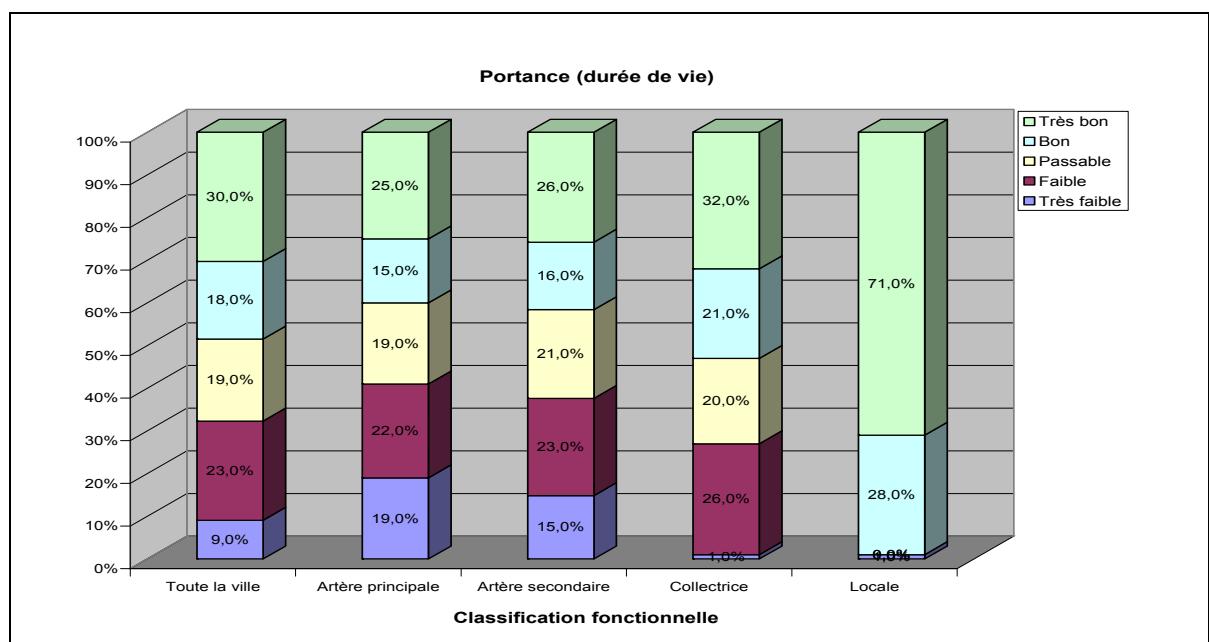


Figure 3.3 Portance.
Adaptée de Consortium (2004, p. 7-9)

Il est à noter que très peu d'essais ont été effectués pour évaluer la portance des rues locales. Moins de 2 % de la longueur des rues de cette catégorie ont été évalués.

De plus, étant donné que la majorité de véhicules lourds sur ces rues locales sont constitués d'autobus circulant à faible vitesse, le dommage réel peut être plus important que celui reflété par le résultat des mesures de portance.

État global (indice OCI)

Le calcul retenu par le consortium pour l'évaluation de la cote d'état global est le suivant :

- Réseau supérieur (artères, collectrices et certaines rues locales fortement sollicitées)

$$\text{Indice OCI} = 0,5 * (\text{indice PCI}) + 0,4 * (\text{indice uni}) + 0,1 * (\text{indice de portance}) \quad (3.1)$$

- Réseau inférieur (rues locales) :

$$\text{Indice OCI} = \text{Indice PCI} \quad (3.2)$$

L'indice d'état global se situe dans les plages « très bon » à « bon » pour l'ensemble du réseau. Cependant, 8 % du réseau se situe dans les plages « faible » à « très faible ». Voir figure ci-dessous.

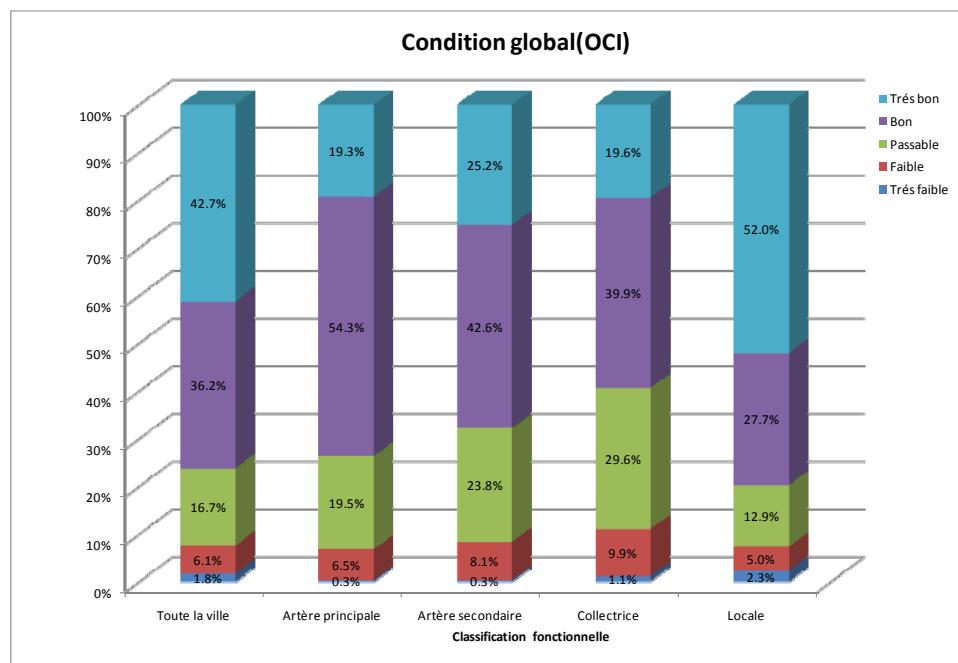


Figure 3.4 État global.
Adaptée de Consortium (2004, p. 7-12)

Ces résultats montrent que l'état des rues locales influence de façon importante (Voir figure 3.4) la distribution des plages de l'indice OCI « toute la Ville », car l'absence généralisée de

données de portance et plus particulièrement d'uni, cause une hausse significative de la valeur de l'indice d'état global OCI.

3.2.2 Constats à la suite de l'analyse statistique

Le tableau 3.1 présente les résultats de la compilation statistique effectuée sur l'ensemble des données d'état recueillies pour toute la Ville en fonction de la classification fonctionnelle.

Tableau 3.2 Synthèse des données d'état
(Données décembre 2003, sauf portance : données mars 2004)
Adapté de Consortium (2004, p.7-13)

Classification fonctionnelle	Synthèse des données d'état (Cote sur 100)											
	PCI			Uni			Portance (2004)			OCI		
	Nb de UG	Moyenne	Écart type	Nb de UG	Moyenne	Écart type	Nbre de UG	Moyenne	Écart type	Nb de UG	Moyenne	Écart type
Artère principale	681	77.10%	20.7	609	56.90%	13.8	457	51.80%	31	681	67.50%	16.4
Artère secondaire	1273	75.40%	22.0	986	58.70%	13.4	745	54.30%	29.6	1273	68.80%	17.7
Collectrice	1563	71.30%	22.6	1325	54.20%	12.7	976	59.40%	25.9	1563	63.60%	17.6
Locale	7681	77.60%	22.5	64	55.30%	13.0	119	88.50%	13.6	7681	77.60%	20.5

Indice d'état visuel (PCI)

Les valeurs moyennes pour les différentes classes de chaussée se situent dans la plage d'appréciation « bon », avec des valeurs allant de 71,3% à 77,6%. Les écarts types se situent entre 20,5 et 22,6.

Indice de confort au roulement

Les valeurs moyennes de l'indice de confort au roulement, pour les différentes classes de chaussées, se situent dans la plage d'appréciation « passable », variant entre 56,2% et 58,7%. Les écarts types varient entre 12,7 et 13,8.

Les faibles valeurs obtenues démontrent que les dégradations présentes sur la chaussée ont des conséquences importantes sur le confort des usagers.

Indice de portance (mars 2004)

Les valeurs moyennes des cotes de portance calculées pour les sous-réseaux des artères principales, artères secondaires et rues collectrices sont respectivement de 51,8 %, 54,3 % et 59,4 %, ce qui correspond à la plage « passable ».

Pour le réseau local, la valeur moyenne de la cote est de 88,5, ce qui correspond à la plage « très bon ». Ce résultat doit être pris avec discernement, compte tenu des explications données précédemment.

Les types de dégradation observée *in situ* (ornières et fissures en traces de roues), « faible » à « très faible » nous indiquent que les valeurs moyennes présentées sont, dans l'ensemble, représentatives de la portance réelle des chaussées étudiées.

Indice d'état global (OCI)

Les valeurs moyennes se situent dans la zone inférieure de la plage d'appréciation « bonne » pour les artères principales, secondaires et collectrices (respectivement 67,5%, 68,8% et 63,6%). Les valeurs moyennes de l'indice OCI des rues locales se situent dans la plage d'appréciation « bonne », avec une valeur de 77,6%.

Dans le rapport (juillet 2004), on considère que cette valeur moyenne peut être surestimée puisque les relevés de confort de roulement n'ont généralement pas été effectués sur ces rues et qu'il faut tenir compte de cette situation lors de la préparation du plan stratégique d'intervention (Consortium, 2004).

3.2.3 Synthèse des résultats de l'étude des chaussées (Consortium, 2004)

Les résultats de l'évaluation de l'état des chaussées résumés précédemment, montrent des faiblesses du réseau au niveau de la portance, surtout pour les artères principales, secondaires et collectrices.

En effet, sur les artères principales et secondaires, les dégradations observées et les plus importantes sont dans les pistes de roues, suivis des fissures transversales. Sur les collectrices, les dégradations prédominantes sont respectivement, les fissures transversales et les dégradations dans les traces de roues.

Quant aux rues locales, les dégradations les plus fréquentes sont les fissures transversales suivies des fissures dues au gel auxquels s'ajoutent les rapiéçages, les coupes et les tranchées.

Les causes potentielles des différentes dégradations observées sont résumées et présentées ci-après:

- Les fissures dans les pistes de roues, les ornières et les fissures de gel sont dues à un dimensionnement structural inadéquat résultant d'une connaissance insuffisante due au trafic lourd et de l'état du sol support, à l'épaisseur insuffisante de revêtements en enrobé bitumineux, à la modification des états d'exploitation et au dépassement de la durée de vie structurale prévue.
- Les fissures transversales sont dues au retrait thermique et aux joints de construction transversaux.
- Les fissures longitudinales sont dues aux joints longitudinaux entre les bandes de pavage résultat d'un collage déficient.
- Les rapiéçages, les coupes et les tranchées résultant des réparations d'infrastructures souterraines (bris d'aqueduc ou d'égouts) non réhabilitées lors des travaux routiers ou de travaux d'installation de services d'utilité publique.

3.2.4 Synthèse des résultats de la mise à jour (Consortium, 2006)

En 2006, le consortium a reçu un autre mandat pour la mise à jour du programme d'inventaire et d'entretien des infrastructures urbaines.

L'exercice de la mise à jour pour les chaussées couvrait, entre autres, les points suivants :

- Intégration des interventions sur les chaussées effectuées entre 2003 et 2005.
- Intégration des nouvelles données de trafic.

Après l'intégration des interventions sur les chaussées (reconstruction, réhabilitation majeure et resurfaçage) et en comparant les résultats de 2003 à ceux de 2006, on constate que le réseau routier s'est globalement détérioré, et ce, en dépit des interventions. Voir les résultats résumés au tableau ci-après.

Tableau 3.3 État global (OCI) comparé 2003-2006
Adapté de Consortium (2006, p. 27)

Synthèse des données de l'état global (OCI)															
	TRÈS FAIBLE (0 à 20)			FAIBLE (20 à 40)			PASSABLE (40 à 60)			BON (60 à 80)			TRÈS BON (80 à 100)		
	Nbre d'UG	Longueur km	%	Nbre d'UG	Longueur km	%	Nbre d'UG	Longueur km	%	Nbre d'UG	Longueur km	%	Nbre d'UG	Longueur km	%
	Toute la ville 2006	206	43	2.5%	933	152	8.8%	2547	371	21.5%	3784	568	32.9%	4080	596
Toute la ville 2003	148	31	1.8%	601	103	6.1%	1882	283	16.7%	3611	551	32.6%	4956	721	42.7%

L'intégration de nouvelles données de trafic a eu un impact qui se traduit par une augmentation du DJMA et une légère diminution de la durée de vie. Ces nouvelles données rendent la sollicitation théorique, utilisée dans les calculs, plus représentative de la réalité.

Voir tableau 3.4.

Tableau 3.4 Portance (durée de vie) comparée 2004-2006
Adapté de Consortium (2006, p. 27)

	Synthèse des données de portance														
	Très faible (0 à 2)			Faible (2 à 5)			Passable (5 à 10)			Bon (10 à 20)			Très bon (20 à 50)		
	Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur	
		km	%		km	%		km	%		km	%		km	%
Toute la ville 2006	572	83	22,3%	577	98	26,2%	397	70	18,7%	311	52	14,0%	429	70	18,7%
Toute la ville 2004	213	36,2	9,0%	560	90,6	23,0%	431	74,4	19,0%	410	72	18,0%	695	118,3	30,0%

Les données présentées dans le tableau 3.3 combinent les mesures de deflectomètre de 2003 avec les DTN (*Daily Traffic Number*) de 2005. L'état du réseau routier aujourd'hui n'est pas meilleur (*Voir figure 3.5*), car la programmation des interventions sur les infrastructures municipales priorise le réseau d'alimentation en eau potable (aqueduc), le réseau d'égout puis la chaussée en dernier et ce pour répondre aux exigences des programmes de subvention mis sur pied par les gouvernements.

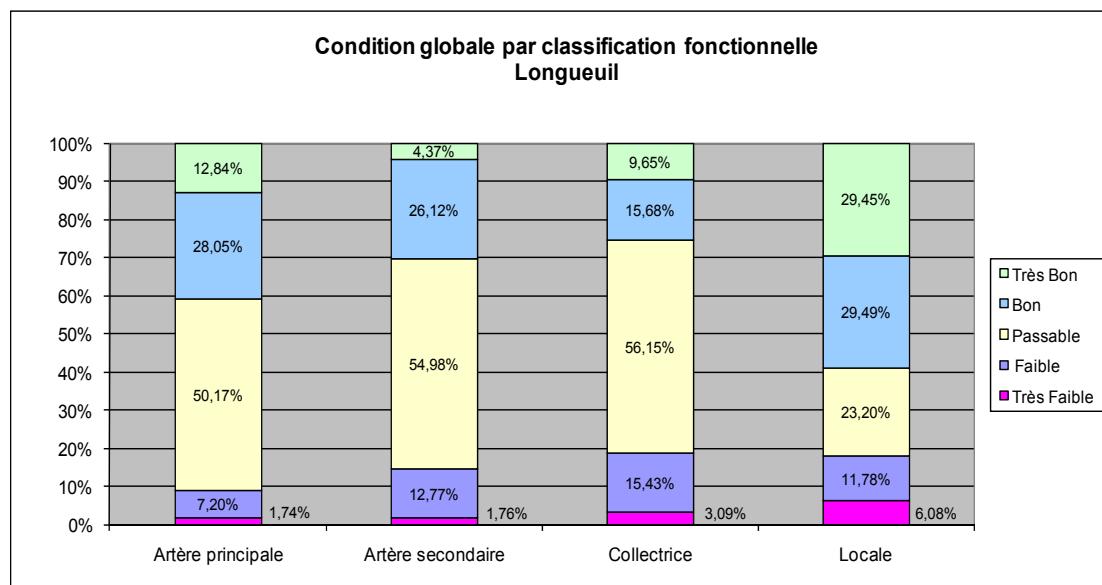


Figure 3.5 État global, données 2009.
Adaptée des données du service de la planification de la Ville de Longueuil

3.3 Recommandations

Dans le rapport final de juillet 2004, le consortium recommande en conclusion ce qui suit :

«Au niveau du réseau routier, il serait très important de mettre en place des campagnes de comptage de trafic afin d'obtenir les données requises pour mieux définir la vie résiduelle des chaussées et, surtout, pour prévoir un dimensionnement structural adéquat et correspondant aux besoins des usagers.» (Rapport final, 2004, p. 10-6).

En effet, pour avoir des chaussées efficaces et prolonger leurs durées de vie, on doit passer par un bon dimensionnement structural. Aussi, il faut considérer:

- le trafic et bien reconnaître l'état du site et la sollicitation imposée par le trafic lourd;
- les conditions climatiques (les cycles de gel et dégel, les variations de températures,...), afin d'adapter le choix des matériaux de la structure de chaussée, incluant l'enrobé, à ces conditions, pour les constructions nouvelles ou les reconstructions et réhabilitations;
- le sol support, car il est important de toujours faire une investigation afin de connaître la nature du sol et ses propriétés intrinsèques (mécaniques, physiques et chimiques);
- les matériaux utilisés pour la construction des différentes couches de la structure de la chaussée tout en respectant les règles et procédures reconnues de mise en œuvre;
- entretenir les chaussées et ne pas abuser de leur durabilité.

Le titre suivant précise ce que la Ville de Longueuil a mis en œuvre et ce qu'elle recherche afin d'assurer la performance et la pérennité de son réseau routier.

3.4 Caractérisation des particularités de la Ville de Longueuil

3.4.1 Objectifs de performance et durée de vie

La Direction du génie a élaboré, en mars 2006, un nouveau cahier des clauses techniques générales pour la construction des chaussées, qui est mis à jour régulièrement, afin d'améliorer la qualité de la chaussée en reconstruction ou en construction nouvelle. Des exigences sont précisées, entre autres, pour:

- l'amélioration de la qualité des matériaux granulaires fournis pour les travaux de construction des structures de chaussée ainsi que leur mise en œuvre;
- l'adoption des classes de PG pour un meilleur comportement thermique des enrobés;
- la mise en œuvre des matériaux granulaires et des enrobés bitumineux;
- la construction de drains de rive, pour un meilleur drainage de la structure de chaussée lors de la construction et de la mise service.

D'autre part, l'implantation du programme d'inventaire et d'entretien des infrastructures municipales a abouti à un système intégré des infrastructures pour toute la Ville visant à augmenter la durée de vie et à améliorer la qualité des infrastructures municipales. Ce programme est axé sur la connaissance des réseaux, sur les interventions prioritaires et sur les disponibilités financières réelles.

Les interventions prioritaires ciblent le réseau d'aqueduc, puis d'égout, dans le but de réduire les risques de bris majeurs entraînant des interruptions de service et des coûts considérables.

Pour le réseau routier, cela suppose moins de rapiéçages, moins de tranchées, moins de remaniements de la fondation et de la structure de chaussée, etc.

Finalement, en réunissant toutes les conditions favorables, la Ville vise une durée de vie de 25 ans, et même plus avec de l'entretien, pour toutes les chaussées en réhabilitation, en reconstruction et en construction nouvelle.

En effet, la durée de vie est gouvernée par des points faibles au niveau du sol et des matériaux, de mise en œuvre, de l'agression du climat, de l'eau ou du trafic, de la conception (AQTR, 2009). En contrôlant les facteurs altérant la durée de vie d'une chaussée, comme nous l'avons décrit précédemment et grâce à un bon dimensionnement structural, nous venons de faire un pas vers les chaussées à durée de vie prolongée.

3.4.2 Caractérisation des sols supports de Longueuil

Le sol support est défini comme le sol préparé et compacté sur lequel la structure de la chaussée sera posée. La plate-forme ainsi obtenue doit être suffisamment résistante et homogène pour soutenir les équipements de construction et bien entendu la structure de la chaussée. À cet effet, il est important de connaître certaines propriétés des sols afin d'évaluer leur capacité comme assises routières.

La caractérisation des sols supports sur le territoire de la Ville de Longueuil a été effectuée en deux étapes.

Étape 1 : Analyse de deux cartes géotechniques publiées par le ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec.

La première carte «Carte A» est intitulée «levé géotechnique de la région de Boucherville-Tracy», réalisée par D.J. Dion entre 1975 et 1976. La deuxième carte «Carte B» est intitulée «levé géotechnique de la région de Laprairie-Saint-Jean», réalisée par D. J. Dion et P. Caron 1980.

La carte A, couvre le territoire de Saint-Hubert et une bonne partie de Longueuil. Les sols sont constitués de till original ou remanié, reposant directement sur le roc qui est situé entre 3 et 6 mètres de profondeur:

- La teneur en eau (W) est de 12 %.
- La capacité portante (CP) du till est supérieure à 400 KPa.

La carte B, couvre la partie sud du Vieux-Longueuil et le territoire de Greenfield Park. Les sols sont constitués de till (dans la partie nord) et d'argile (dans la partie sud) recouverte d'une mince couche (< 1m) de sable de la mer Champlain ou de sable des basses terrasses. Le roc est situé entre 3 et 6 mètres de la surface avec présence de till au-dessus du roc. Les caractéristiques de l'argile sont:

- La teneur en eau $W \approx 64 \%$.
- Sensibilité (St) faible.
- $Cu < 40 \text{ KPa}$ (résistance au cisaillement des sédiments non remaniés).

Étape 2 : dans cette étape, les rapports de laboratoire réalisés dans le cadre des études géotechniques et caractérisation des sols pour divers projets de construction des infrastructures municipales, ont été examinés. Une localisation des forages et des puits d'exploration a été faite sur la carte de la Ville, arrondissement par arrondissement (Longueuil, Saint-Hubert et Greenfield Park), les caractéristiques des sols supports sont aussi compilées dans des tableaux (voir annexes VI à VIII, p. 114 à 122):

Arrondissement de Saint-Hubert, les sols sont constitués de:

- Argile silteuse avec trace de sable, classe CH.
- Silt sableux à sable silteux avec trace de gravier et silt argileux, classe ML.
- Gravier silteux et sableux, classe GM.
- Le socle rocheux est rarement rencontré.

Arrondissement de Greenfield Park, les sols sont constitués de:

- Argile et argile silteuse à silt, classe CL.
- Silt argileux à silt et argile, classe CH.
- Le socle rocheux est rencontré entre 1,20 et 4,45 m de profondeur, il est composé de shale gris ou gris noir, il est très fracturé et très altéré dans la plupart des cas.
- La profondeur de la nappe d'eau souterraine est rencontrée à quelques forages seulement.

Arrondissement de Vieux-Longueuil, les sols sont constitués de:

- Argile silteuse avec trace de sable, classe variable CL ou SM ou CH.
- Remblai : silt, un peu de sable et de gravier classe variable ML ou CL ou CH.
- Till : silt et sable trace d'argile et un peu de gravier, sable silteux, classe variable SM ou CL.
- Le socle rocheux est rencontré entre 0,30 et 2,60 m de profondeur, il est composé de shale gris, il est très fracturé et très altéré jusqu'à la profondeur de 1,70 m.
- La profondeur de la nappe d'eau souterraine est rencontrée à quelques forages seulement.

L'étape 2 vient compléter l'étape 1. Ainsi, les sols supports pour les fondations de chaussée se sont mieux précisés.

Il est important de préciser que la classification adoptée est celle du «Système unifié de classification des sols», qui est la traduction française du système de classification américaine appelée «*Unified soil classification system*» (USCS). Les caractéristiques sont établies à partir des tableaux joints aux annexes VIII et IX (p. 123 et 124), qui définissent respectivement la classification des sols selon la norme du MTQ (chapitre 1, normes 1101) et les caractéristiques s'appliquant aux routes et aux terrains d'aviation pour le génie militaire canadien. Le tableau 3.5 présente un résumé de la caractérisation des sols de Longueuil. Les cartes établies se trouvent à l'annexe XV (p. 131).

Tableau 3.5 Tableau récapitulatif de la caractérisation des sols de Longueuil

Type de sol	Caractéristiques					
	Gélivité	Possibilité de tassement et de gonflement	Drainabilité	CBR	Module de réaction K	
					lb/po ³	MPa/m
Argile silteuse, silt et argile						
Classe CH, $W_L > 50$	Moyenne	Élevée	Pratiquement imperméable	15 ou moins	50-150	13.57 - 40.71
Classe CL, $W_L < 50$	Moyenne à très élevée	Moyenne	Pratiquement imperméable	15 ou moins	50-150	13.57 - 40.71
Silt sableux, silt argileux						
Classe ML	Moyenne à très élevée	Faible à moyenne	Passable à médiocre	15 ou moins	100-200	27.14 - 54.28
Classe SM	Faible à élevée	Faible à moyenne	Médiocre à pratiquement imperméable	SO	100-400	13.57 - 108.57
Gravier silteux et sableux						
Classe GM	Faible à moyenne	Faible	Passable à médiocre	20-60	200-500	54.28 - 135.72

3.4.3 Interprétation et recommandations

Les sols de la région de Longueuil présentent une certaine constance en ce qui a trait à la nature des sols d'infrastructure. On observe sur les cartes ainsi établies, des sols principalement constitués d'argile silteuse provenant de la sédimentation de particules fines déposées par la mer de Champlain qui s'est formée au terme de la dernière glaciation

($\pm 10\ 000$ ans). Le retrait de la mer s'est fait par étapes, ce qui explique la présence de terrasses constituées de sables fins, de silt sableux et argileux sur tout le territoire (Dion et al, 1980).

Cette argile silteuse raide à très raide est le résultat de la surconsolidation suite aux nombreux cycles de gel-dégel, ainsi qu'à l'oxydation. Généralement, cette argile (brune) rencontrée plus en surface, constituera le sol support pour les infrastructures (structure de chaussée et réseaux souterrains). Il peut arriver, pour des raisons de faisabilité, qu'on réalise les infrastructures après d'importants déblais. On peut alors atteindre, sous la croûte argileuse, une argile (grise) plus molle et sensible. Cette dernière est peu ou pas oxydée et a subi peu de gel. Dans ce cas, il est recommandé de reporter la construction d'au moins une année, afin de lui permettre de subir au moins un hiver et quelques cycles de gel et dégel. Il est aussi recommandé de reporter le pavage car les soulèvements au gel seront importants.

Il est important de souligner que le niveau de l'eau souterraine peut fluctuer et se situer à des profondeurs différentes selon les années, les saisons et les conditions climatiques (pluies abondantes, fonte des neiges, période de sécheresse, etc.)

Les variations saisonnières de la température et de l'humidité causent des changements considérables de la résistance des sols dans les zones soumises aux conditions de gel et dégel. La figure jointe à l'annexe X (p. 125), montre la corrélation entre le niveau de l'eau et la ligne de gel.

Ces variations saisonnières ont un effet beaucoup plus important sur les chaussées flexibles, qu'il ne l'est sur les chaussées rigides, car leurs comportements dépendent plus des couches sous-jacentes dues au fait que la répartition des charges (contraintes appliquées en surface) est beaucoup plus large en profondeur (Assaf, 2007).

Or, à la lumière de notre caractérisation des sols de Longueuil, il ressort qu'ils sont très sensibles, majoritairement gélifs à très gélifs. Cette susceptibilité du sol à l'eau et au gel donne lieu à des déformations dans la structure de la chaussée qui finissent par apparaître

dans le revêtement. Aussi, il faut porter une attention particulière aux caractères et conditions suivants, selon les phases de progression du projet.

Phase avant projet : il est important de faire une étude géotechnique pour les sols à construire, et préciser pour ces sols à grains fins les caractéristiques suivantes; teneur en eau, limite de plasticité et limite de liquidité (limite d'Atterberg).

En général, plus la teneur en eau d'une argile ou d'un silt est élevée, moins le sera sa résistance et par conséquent, sa capacité portante.

Limite d'Atterberg :

Atterberg est un pédologue suédois qui a été le premier en 1908 à définir les limites de liquidité (W_L) et de plasticité (W_p) qui sont des états différents selon lesquels, un sol à grains fins peut exister, dépendamment de sa teneur en eau (ω).

- W_p , la limite de plasticité est la limite entre les états semi-solide et plastique.
- W_L , la limite de liquidité est la limite entre les états plastique et liquide.

$$W_L - W_p = I_p \quad (3.3)$$

- I_p , est l'indice de plasticité, il représente l'intervalle d'humidité correspondant à l'état plastique d'un sol.

Les limites d'Atterberg sont des données très importantes pour la classification et l'identification des sols à grains fins. Elles sont utilisées pour délimiter les propriétés, le degré de compaction et le comportement de mélange de sol (argile, silt, sable gravier,...)

Lorsque :

$$W_L \leq 25 \text{ et } I_p \leq 5, \quad (3.4)$$

Les sols sont souhaitables pour les couches de base et de fondation.

- Les sols sableux et les silts sont caractérisés par un faible indice de plasticité, contrairement à la plupart des argiles qui ont un indice de plasticité élevé.

- Les sols dont l'indice de plasticité est élevé sont très plastiques et généralement très compressibles et fortement cohésifs.
- Les sols qui n'ont pas de limite de plasticité, ont un indice de plasticité nul, comme les sables propres.

$$I_L = (\omega - W_p) / (W_L - W_p) \quad (3.5)$$

I_L , est l'indice de liquidité.

Les sols pour lesquels $I_L \geq 0,9$ sont des sols extrêmement gélifs et pouvant produire des tassements importants au cours des premiers cycles de gel – dégel.

Phase construction : le silt et l'argile sont très sensibles au remaniement et certains silts saturés d'eau peuvent se liquéfier lorsqu'ils sont remaniés. Les tills (regroupent un mélange de silt, d'argile de sable et de cailloux) se manient généralement bien, sauf lorsque le pourcentage de fines particules est élevé ou en présence de gros blocs (> 50 cm de diamètre), aussi il faut prêter une attention particulière au drainage.

Le drainage a pour but d'améliorer le fonctionnement de la structure de chaussée au cours des cycles de gel et de dégel. L'objectif principal recherché est d'améliorer l'état hydrique des matériaux du corps de chaussée et du sol support (SETRA-CSTR, 1992).

En effet, la teneur en eau va favoriser la déformation des sols en fléchissant. Comme cité précédemment pour les argiles et les silts en particulier, la teneur en eau a un impact sur la résistance du sol qui dépend du drainage, du niveau de la nappe phréatique, des infiltrations d'eau, de l'état du revêtement et de la perméabilité de la structure (Assaf, 2007).

Aussi, il est recommandé de placer une membrane géotextile afin d'éviter la remontée capillaire et des particules fines (argile), il est aussi recommandé, la construction des drains de rive, qui non seulement va servir d'écran pour les infiltrations citées plus haut, ils vont permettre d'évacuer, lors de la construction, l'eau contenue dans le sol de l'infrastructure

(pluies, etc.) en subissant une décompression naturelle suite au chargement des différentes couches de la structure de chaussée et leur compactage. Ce système de drainage latéral recommandé va améliorer la performance et la durabilité des chaussées.

3.4.4 Caractérisation du trafic

Le trafic détermine aussi la constitution de la chaussée. L'épaisseur de la couche de pavage dépend du volume de circulation et du nombre de poids lourds.

Des campagnes périodiques de comptage sont réalisées par le service de la circulation de la Ville. Ces données de comptages routiers, résumées au tableau joint à l'annexe XI (p. 126), combinées aux dernières données 2008 nous ont permis d'établir et d'arrêter les caractéristiques du trafic de Longueuil (Saint-Hubert, Greenfield Park et Vieux-Longueuil) , (*Voir tableau 3.6*).

Tableau 3.6 Caractérisation du trafic de la Ville de Longueuil

Classification fonctionnelle	DJMA	% camion
Locale	1363	$\leq 2\%$
Collectrice	5017	$\leq 5\%$
Artère secondaire		
Industrielle	9352	10 %
Autre qu'industrielle	10376	$\leq 5\%$
Artère principale		
Industrielle	12056	10 à 14 %
Autre qu'industrielle	16735	$\leq 5\%$

Il est important de préciser que le problème en milieu municipal, est l'absence de données sur la distribution des types de véhicules lourds.

3.5 Cheminement décisionnel pour le catalogue

Même si le réseau routier de Longueuil est principalement constitué de chaussées souples (98,2 %), il y a un intérêt et un avantage à considérer les chaussées rigides (béton), plus

particulièrement aux endroits les plus sollicités par la circulation lourde (camions et autobus). A cet effet, notre démarche pour la réalisation du catalogue est donnée par l'arbre décisionnel ci-après à la figure 3.6.

Ainsi, on répond au besoin de la Ville d'avoir un catalogue de dimensionnement structural des chaussées souples par classe fonctionnelle qui tient compte des cas particuliers des chaussées fortement sollicitées, et cela indépendamment de la classe fonctionnelle.

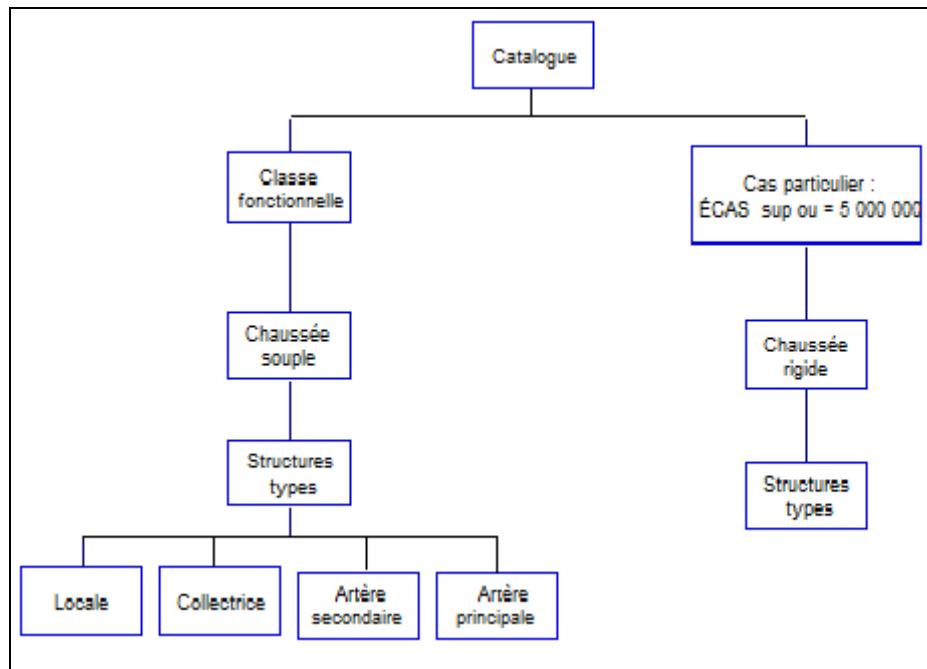


Figure 3.6 Arbre décisionnel pour le choix des structures de chaussée pour le catalogue.

Ainsi, dans un premier temps sont proposées des structures souples pour tout le réseau routier selon la classe fonctionnelle avec une durée de vie de 25 ans. Dans un second temps, sont considérés les cas particuliers de rues avec un ECAS supérieur ou égal à 5 millions, indépendamment de la classe fonctionnelle. Il est alors proposé une alternative qui consiste à choisir une structure rigide d'une durée de vie de 30 ans.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a permis, dans un premier temps, de dresser l'état du réseau routier de Longueuil principalement de 2004 à 2010, l'état global des chaussées ne s'est pas amélioré malgré les diverses interventions de reconstruction et de renforcement (réhabilitation). Cet état de fait est le résultat de la politique d'intervention pour la réhabilitation qui dépend de l'état des infrastructures souterraines, principalement les réseaux d'aqueduc et d'égout. Ainsi lorsqu'une chaussée arrive à la fin de sa durée de vie et nécessite une réparation majeure ou une reconstruction, l'intervention ne se fera que si le réseau souterrain nécessite une réhabilitation. La reconstruction de la chaussée n'est réalisée que longtemps après la fin de sa période de conception. Cette situation a pour effet d'augmenter, les coûts d'entretien de surface pour maintenir d'un niveau de service à la limite de l'acceptable, sans oublier le coût aux usagers pour l'entretien de leurs véhicules qui subissent des endommagements cumulés en raison de l'état du réseau routier.

La caractérisation des sols de Longueuil a occupé une part importante dans ce chapitre, ce qui a permis de dresser des cartes des sols support par arrondissement. Ces cartes seront alimentées régulièrement par des mises à jour suite aux nouvelles études géotechniques avant tout projet de construction à chaque année.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE DE DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL

4.1 Méthode de dimensionnement structural des chaussées souples du MTQ

La construction des chaussées de qualité nécessite que les travaux soient exécutés selon des règles approuvées et adaptées aux sols et au climat de la région. Le service des chaussées du ministère des Transports du Québec (MTQ) a adopté la méthode de l'AASHTO pour le dimensionnement structural des chaussées souples et y a apporté des ajustements pour tenir compte des conditions climatiques du Québec.

Élaboré sur la base de cette méthode, des abaques de dimensionnement ainsi qu'une norme pour les routes à faible trafic ont été utilisés dès 1994 au ministère des Transports du Québec. En 1999, le logiciel pour le dimensionnement structural des chaussées souples (DLC, version 1.0) a été lancé sur l'intranet du MTQ, puis sur l'internet en 2001 sous le nom de Chaussée 1.1. En 2003, une mise à jour du logiciel et des révisions mineures ont été apportées (Chaussée 1.2).

En 2006, est née la dernière version suite à une importante mise à jour qui comporte principalement l'ajout d'un modèle de calcul de la profondeur de gel et des soulèvements qui est adaptée à partir du potentiel de ségrégation «SP» et du modèle finlandais «SSR». La nouvelle version permet donc un dimensionnement structural au gel de type mécaniste-empirique. Le calcul structural se fait selon la méthode empirique établie par l'AASHTO en 1986 et rééditée en 1993.

Dans ce qui suit, est décrit le dimensionnement structural des chaussées souples au MTQ (logiciel Chaussée2), basé principalement sur le manuel de Denis St-Laurent (décembre 2006).

4.2 Calcul structural

4.2.1 Équation de l'AASHTO

La méthode de l'AASHTO est basée sur une corrélation statistique dérivée des observations de l'essai routier AASHO de 1962 et a subi plusieurs évolutions entre 1972 et 1993.

L'équation pour les chaussées bitumineuses est:

$$\log W_{18} = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \log (SN+1) - 0,20 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 \log (145,04 M_r) - 8,07 \quad (4.1)$$

où

W_{18} : nombre total admissible de passages d'essieux équivalant à un essieu simple à roues jumelées de 8 165 kg (18 000 lb)

S_0 : erreur standard de l'estimation, incluant la dispersion de toutes les données (matériaux, trafic, chantier, drainage, modèle, etc.). La valeur recommandée est 0,45.

Z_R : déviation normale associée au risque de calcul (1-R). Une table statistique standard (Tableau 3.1) sert à déterminer directement le Z_R à utiliser en fonction du niveau de confiance (R) visée.

R: niveau de confiance ou fiabilité. Il représente la probabilité que la chaussée présente un niveau de qualité supérieur ou égal à celui visé à la fin de la période de conception. (1-R) représente le risque de calcul.

PSI: indice de viabilité de la chaussée. C'est un indice de qualité global de la chaussée qui varie entre 0 et 5. Le ΔPSI est la différence entre une chaussée neuve et une chaussée détériorée. L'écart admis pour les deux états initiaux est présenté avec les valeurs 4,2 et 1,5.

M_r : module de résilience effectif du sol d'infrastructure. Il sert à quantifier la rigidité d'un matériau. Le M_r de chaque couche est aussi utilisé pour déterminer le nombre structural.

SN: nombre structural. Il exprime l'épaisseur effective de la structure de la chaussée dont on évalue la portance.

Tableau 4.1 Déviation normale en fonction
du niveau de confiance
Tiré de St-Laurent (2006, p. 26)

R (%)	Z _R
50	0
60	-0,253
66	-0,412
70	-0,524
75	-0,674
80	-0,841
85	-1,037
90	-1,282
91	-1,340
92	-1,405
93	-1,476
94	-1,555
95	-1,645
96	-1,751
97	-1,881
98	-2,054
99	-2,327
99,9	-3,090
99,99	-3,750

4.2.2 Principe d'application de l'équation de l'AASHTO

L'équation (4.1) exprime un lien entre la durée de vie en nombre d'essieux lourds admissibles (W_{18}) et la détérioration du niveau de service (ΔPSI). Le dimensionnement structural de la chaussée est jugé adéquat lorsque sa durée de vie, exprimée en nombre de passages d'essieux équivalant à un essieu de 8,2 tonnes est supérieure ou égale au nombre de passages prévu de l'essieu de référence. Après la résolution de cette équation, dont l'inconnu est SN, il faut déterminer l'épaisseur des différentes couches constituant la structure de la chaussée à partir de l'équation (4.2) qui exprime le nombre structural.

$$SN_n = (a_1D_1 + \dots + a_i m_i D_i + \dots + a_n m_n D_n) / 25,4 \quad (4.2)$$

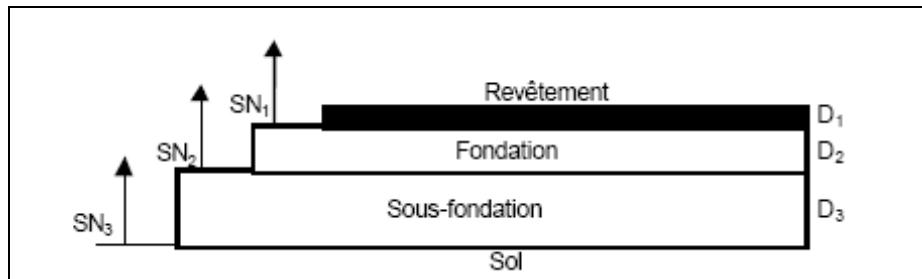


Figure 4.1 Principe d'un système multicouche.

Tirée de St-Laurent (2006, p. 28)

où

SN_n : nombre structural composé pour n couches

D_i : épaisseur de la couche i

m_i : coefficient de drainage de la couche i

a_i : coefficient structural de la couche i.

Le coefficient pondéral de chaque couche dépend de la nature des matériaux a_i et des conditions de drainage de la couche m_i .

Les coefficients structuraux a_i expriment la rigidité d'une couche en épaisseur effective d'apport structural pour chaque tranche de 1 po (25,4 mm) de matériau. Ils sont déterminés à partir de la valeur de M_r par l'équation suivante:

$$a_i = f(M_r) = K_a \log (145,04 \times M_r) - K_b \quad (4.3)$$

Les valeurs de K_a et K_b dépendent du type de matériau (*Voir* tableau 4.2).

Le coefficient de drainage m_i tient compte de la capacité des couches à drainer l'eau. Il varie selon la perméabilité des matériaux, l'indice de vide, les pentes, l'épaisseur des couches et la

distance à drainer. Son choix est basé sur le temps nécessaire pour drainer 50 % de l'eau libre dans la fondation et la sous-fondation. Le logiciel «Chaussée 2» recommande une valeur de 0,8 pour le Québec.

Tableau 4.2 Valeur des coefficients K_a et K_b en fonction
du type de matériau
Tiré de St-Laurent (2006, p. 28)

	K_a	K_b
Revêtement d'enrobé bitumineux	0,414	1,896
Fondation granulaire	0,249	0,977
Sous-fondation granulaire	0,227	0,839

4.2.3 Module de résilience

Le module de résilience varie selon le type de matériau (granulaire, bitumineux..), de ses caractéristiques intrinsèques, de sa teneur en eau et du degré de compaction. Pour un même matériau le module de résilience peut varier selon des facteurs externes, comme la température et l'état de contrainte auquel il est soumis. Ainsi, le module de résilience d'un même matériau au sein d'une même structure de chaussée présentera des variations saisonnières, et même journalières.

Il existe différents modèles de comportement du module de résilience qui peuvent être associés à chaque type de matériau. Les modèles utilisés par le logiciel «Chaussée 2» sont représentés au tableau 4.3.

Le module de résilience ainsi modélisé et affiché dans le module de calcul structural du logiciel est directement considéré comme étant la valeur effective tenant compte de toutes les variations saisonnières. Le module de résilience effectif du sol support est défini par la méthode AASHTO 1993 comme une valeur pondérée équivalente à l'effet combiné de toutes les valeurs saisonnières du module.

Le module saisonnier se base sur la quantification du dommage causé à la chaussée durant chaque saison de l'année (*Voir l'exemple à l'annexe XII, p. 127*).

Tableau 4.3 Modèle de modules de résilience pour les matériaux de chaussées
Tiré de St-Laurent (2006, p. 30)

Nom du modèle	Forme de l'équation	Explication
BB	$Mr = 10 (K1 - K2 T^{K3}) + K4$ <p>« + K4 » seulement si épaisseur > 150 mm</p>	<p>Le module est fonction de la température en °C. C'est le cas des revêtements bitumineux, à cause du comportement visqueux du bitume. Cette équation est appliquée à partir de la température effective qui dépend de la zone climatique.</p>
Élastique (pur)	Mr = K ₁	<p>Le module est constant. C'est le cas le plus simplifié. Les sols et les matériaux de chaussées n'obéissent presque jamais à cette loi, mais son utilisation est pratique et se justifie plus facilement lorsque les matériaux sont soumis à un état de contrainte qui varie peu, comme dans le cas des sols supports que l'on trouve à une plus grande profondeur.</p>
K-theta	$Mr = K_1 \theta^{K2}$ <p>où $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$</p>	<p>Le module dépend de la contrainte de confinement totale θ. Ce modèle est souvent utilisé dans le cas des matériaux granulaires. Ceux-ci sont dits « écrouissants », c'est-à-dire que le module augmente lorsque θ augmente (K_2 est positif). Le modèle élastique pur est le cas particulier où $K_2 = 0$.</p>

Le calcul du module de résilience effectif est calculé comme suit :

- Subdivision de l'année, en saisons, pendant lesquelles les différents modules saisonniers sont représentatifs.
- Détermination du module de résilience correspondant à chaque saison de l'année.
- Calcul des dommages relatifs (u_f) associés à chaque module saisonnier.

$$u_f = 1,18 \times 10^8 \times M_r^{-2,32} \quad (4.4)$$

- Somme des dommages relatifs.
- Division du dommage relatif total par le nombre des saisons, pour obtenir la moyenne annuelle.
- Détermination du module de résilience effectif correspondant à la moyenne annuelle des dommages saisonniers.

L'utilisation du tableau joint en annexe XII permet de définir un facteur d'ajustement saisonnier (FAS) décrivant le rapport entre le M_r effectif annuel et la valeur maximale d'été:

$$FAS = M_r \text{ effectif} / M_r \text{ été} \quad (4.5)$$

Le facteur d'ajustement saisonnier FAS, est intégré dans la bibliothèque de référence du logiciel. Il reconstitue ainsi le module d'été des sols et matériaux non liés.

4.3 Dimensionnement au gel

4.3.1 Protection partielle - Gel 1994

La protection contre le gel de 1994 est purement empirique. Elle est basée sur l'expérience, selon les dommages jugés acceptables. En effet, le critère de protection contre le gel utilisé par le MTQ dans la version précédente du logiciel Chaussée est adapté, à partir d'une courbe élaborée au début des années 50 par Transport Canada pour une protection partielle qui correspond à la moitié de la profondeur de pénétration du gel. C'est une règle d'expérience efficace pour une protection partielle au comportement au gel qui est jugée acceptable (*Voir figure 4.2*).

La protection est qualifiée de partielle, car elle indique une épaisseur de chaussée inférieure à la profondeur de pénétration de gel. Le tableau 3.4 donne le pourcentage de protection qu'on peut déduire lorsqu'on divise l'épaisseur de la chaussée par la profondeur du gel (St-Laurent, 2006).

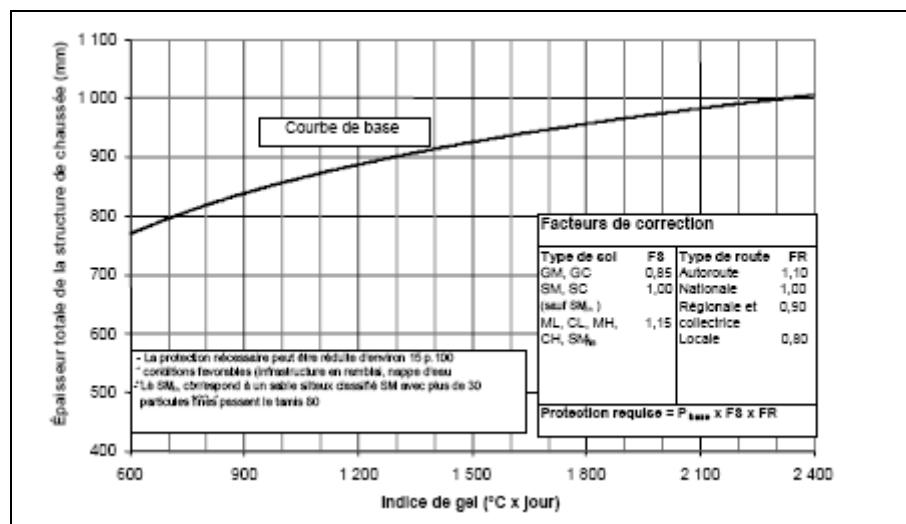


Figure 4.2 Protection contre le gel (approche de 1994).
Tirée de St-Laurent (2006, p.51)

L'usage du critère de protection au gel de 1994 ne permet pas de traiter les sols hétérogènes, les sols argileux humides avec $I_L < 0,9$, argiles varvées, ou plusieurs couches de sol de gélivité différente, ainsi que la présence d'isolant thermique. Il n'offre pas d'indicateur de performance. Il est impossible de décortiquer les variations.

Tableau 4.4 Pourcentage de la profondeur du gel
Tiré de St-Laurent (2006, p. 51)

Indice de gel normal (°C x jours)	Route locale (%)	Autoroute (%)
800	60	80
1 200	50	70
2 000	40	60

Pour conserver le niveau de service et éviter la fissuration Konrad (1998) propose un seuil entre 30 et 60 mm. Les Finlandais Gustavsson et autres (1999) considèrent qu'un seuil de soulèvement situé entre 30 et 100 mm, constitue un préalable pour maintenir un niveau de service acceptable et prévenir la fissuration.

Au service des chaussées du ministère des Transports du Québec, on situe le seuil entre 50 et 70 mm, car les soulèvements différentiels sont peu perceptibles lorsque le soulèvement global est limité à moins de 50 mm, mais peuvent être problématiques quand le soulèvement global excède 80 mm. Ce seuil ainsi établi est basé sur l'expérience accumulée depuis 2000. Il est proposé par la bibliothèque de référence du logiciel.

Le dimensionnement au gel pour les projets routiers est dicté par le besoin d'éviter l'endommagement du revêtement qui se traduit par des fissures appelées lézardes et par des déformations de surface (affectant le confort de roulement). Cet endommagement est provoqué principalement par les soulèvements différentiels.

4.3.2 Protection à soulèvement contrôlé

Les premières méthodes incluent un bagage d'expérience important qui ne peut pas être écarté. L'usage des critères de protection contre le gel de 1994 est recommandé pour baliser les épaisseurs minimales et maximales (profondeur P pour transition). L'évaluation des soulèvements s'ajoute à la pratique actuelle et permet d'adapter la chaussée selon la gélivité des sols et le contexte hydrique.

Pour une protection à soulèvement contrôlé, le calcul du gel est basé sur le modèle SSR, mis au point par Saarelainen en Finlande en 1992. Ce modèle consiste à calculer la profondeur du gel (Z) et le soulèvement (h). Le calcul de Z se base sur l'équilibre du bilan thermique au front de gel, comme illustré à la figure 4.3 et traduit par l'équation (4.6) suivante:

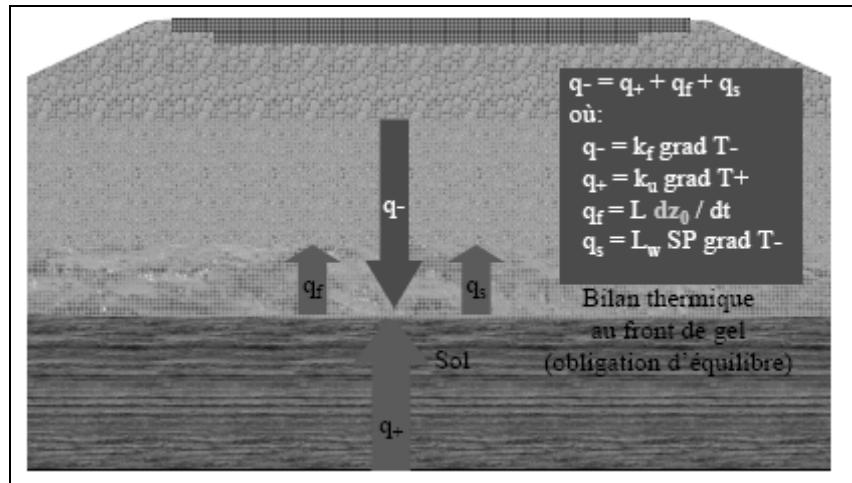


Figure 4.3 Pénétration du gel et soulèvement.
Tirée de AQTR (2008, p. 44)

$$q_- = q_+ + q_f + q_s \quad (4.6)$$

où

$q_- = K_f \text{ grad } T_-$, flux de chaleur qui s'échappe du front de gel vers la surface en traversant la couche gelée (W/m^2)

$q_+ = K_u \text{ grad } T_+$, flux de chaleur du sol non gelé vers le front de gel (W/m^2)

$q_f = L dz_0 / dt$, flux de chaleur généré par le changement de phase de l'eau interstitielle lorsqu'elle se transforme en glace (W/m^2)

$q_s = L_w SP \text{ grad } T_-$, flux de chaleur généré par l'eau supplémentaire de ségrégation au moment de la formation de lentilles de glace (W/m^2)

L'équation du bilan thermique est résolue chaque jour de l'hiver, pour une température moyenne donnée, afin de déterminer l'avancée du front de gel résultant du maintien de l'équilibre des flux thermiques. Le calcul du soulèvement se fait en simulant, d'une part, la formation des lentilles de glace à l'aide du potentiel de ségrégation (SP) et, d'autre part, le gonflement interstitiel des sols saturés lorsque l'eau se transforme en glace (St-Laurent, 2007).

Le potentiel de ségrégation SP d'un sol détermine son potentiel à former des lentilles de glace sous l'effet de gel. Il traduit la réaction du sol à une sollicitation thermique. Il s'agit du

rapport entre le taux de soulèvement du sol et le gradient thermique dans le sol gelé près de l'isotherme 0°C lorsque le front du gel devient stationnaire (DLC, 2002).

$$SP = (dh/dt) / 1,09 * \text{grad } T_f \quad (4.7)$$

où

dh/dt : taux de soulèvement du sol (mm/h)

$\text{grad } T_f$: gradient thermique dans la frange gelée (°C/mm)

1,09 : variation de volume du changement de l'eau en glace

D'où,

$$SP * \text{grad } T_f = (dh/dt) / 1,09 \quad (4.8)$$

Vitesse d'écoulement = Vitesse de soulèvement / 1,09

La dérivée de l'équation (3.8) donne le soulèvement h :

$$h = \Sigma (dh_0 + dh_s) \quad (4.9)$$

Ainsi, le soulèvement au gel est divisé en deux composantes :

- Soulèvement causé par l'eau interstitielle (dh_0). L'eau gonfle de 9% lorsqu'elle se transforme en glace. Ce phénomène affecte principalement les sols saturés (degré de saturation $S_r > 85 \%$), même si leur indice SP est nul.
- Soulèvement de ségrégation (dh_s), résultant de la formation des lentilles de glace par succion d'eau vers le front de gel.

La pression de confinement d'un sol peut s'opposer à son soulèvement. En tenant compte de ce phénomène, on obtient la relation suivante (St-Laurent 2008) :

$$SP = SP_0 e^{-a\sigma} \quad (4.10)$$

où

SP_0 : indice de gélivité sans surcharge

σ : surcharge appliquée sur le sol (MPa).

a : coefficient de surcharge.

Le potentiel de ségrégation (SP) et le coefficient de surcharge (a) sont deux paramètres qui gouvernent la pénétration du gel et l'amplitude du soulèvement.

Le logiciel n'affiche le coefficient de surcharge que lorsque la valeur de SP_0 est supérieure à zéro.

4.4 Débit de circulation et trafic lourd

Le débit de circulation est exprimé en débit journalier moyen annuel (DJMA). Le DJMA évolue dans le temps selon un taux d'accroissement annuel.

$$DJMA_{\text{projeté}} = DJMA_{\text{initial}} \times f_a / n \quad (4.11)$$

La durée de vie structurale est considérée comme adéquate lorsque le nombre d'essieux admissibles (W_{18}) est supérieur ou égal au nombre d'essieux prévus (N_{18}) durant la période de conception.

Le logiciel calcule l'agressivité du trafic pendant la période de conception à l'aide de l'outil ÉCAS, selon la formule suivante :

$$N_{18} = DJMA_{\text{initial}} \times VL \times Dir \times Voie \times CAM \times N \times f_a \quad (4.12)$$

où

N_{18} : nombre total d'ÉCAS prévus durant la période de conception

$DJMA_{\text{initial}}$: débit journalier moyen annuel de véhicules de tous les types, au début de la mise en service

VL: pourcentage de véhicules lourds.

Dir: fraction du camionnage dans la direction analysée.

Voie: fraction du camionnage sur la voie analysée.

CAM: coefficient d'agressivité moyen des véhicules lourds (ÉCAS par camion)

N: 300 jours, correspond au nombre de jours de camionnage durant l'année, sans les jours fériés, et en considérant que samedi et dimanche comptes pour une journée normale

f_a : facteur d'accroissement pour les véhicules lourds

$$f_a = [(1+g)^n - 1] / g \quad (4.13)$$

g : taux d'accroissement (taux composé)

n : période de conception, en années.

La distribution des camions sur les voies est donnée au tableau à l'annexe XIII. Ce tableau est intégré dans l'outil ÉCAS du logiciel. Par défaut, le dimensionnement structural s'effectue pour la voie la plus sollicitée.

Le coefficient d'agressivité moyen (C.A.M.) peut être estimé à partir de valeurs par défaut établies dans la bibliothèque de référence. Il peut aussi être déterminé à partir de résultats de comptage avec classification des camions.

4.5 Justification de l'approche retenue pour le catalogue

Le choix de la méthode de dimensionnement des chaussées souples du MTQ «le logiciel Chaussée 2», répond à l'objectif principal de la Ville qui est d'allonger la durée de vie de ses chaussées (25 à 30 ans) de telle façon que celle-ci s'approche autant que possible de la durée de vie utile (50 ans) du réseau de nos infrastructures souterraines (aqueduc et égouts). Cela est possible grâce au logiciel «Chaussée 2» qui offre une conception structurale appropriée et un dimensionnement au gel adapté aux conditions climatiques québécoises.

4.5.1 Durée de vie

L'introduction du grade PG a amélioré la résistance à la fissuration thermique des enrobés.

Le comportement thermique est un facteur limitatif pour la durée de vie des chaussées. Le

gain de longévité thermique obtenu grâce aux nouveaux bitumes permet de prolonger la durée de vie de conception d'au moins une dizaine d'années pour les chaussées neuves et remises à neuf par rapport à l'ancienne version (Savard et al., 2004; St-Laurent, 2007).

4.5.2 Dimensionnement au gel

Les sols supports pour les chaussées de la Ville de Longueuil ont été caractérisés précédemment comme majoritairement gélifs à très gélifs. Le logiciel «Chaussée 2» permet une conception au gel avec la méthode des soulèvements contrôlés qui assure une meilleure stabilité de la chaussée. Le soulèvement (h) constitue un indicateur mesurable et directement lié aux dommages ou à la performance au gel. En plus du soulèvement, le module de gel permet de prédire la profondeur de gel (z), ce qui est une donnée importante à connaître pour protéger les conduites souterraines (aqueduc, égouts, utilités publiques..).

Les critères de protection au gel de 1994 sont conservés pour baliser les épaisseurs minimales (protection partielle) et maximales (profondeur P) de la chaussée.

Le dimensionnement au gel réduira l'une des principales causes de dégradation de la chaussée due à la pénétration excessive du gel dans les matériaux du sol support.

4.5.3 Climat

Le logiciel «Chaussée 2» permet de choisir la station météorologique la plus représentative du contexte climatique de la région à l'étude. Pour Longueuil, la station de Saint-Hubert est la plus représentative, car elle est au centre même de la Ville.

4.5.4 Trafic

Le logiciel «Chaussée 2» permet de calculer la valeur des ÉCAS (outil ÉCAS) à partir des données de circulation compilées au tableau 4.6. Le coefficient d'agressivité moyen (C.A.M.)

est estimé à partir de valeurs par défaut établies dans la bibliothèque de référence du logiciel car le comptage réalisé par la Ville ne classe pas les camions.

4.5.5 Autres

Le logiciel permet de corriger le calcul structural dans le cas où la couche de roulement est reportée à l'année suivant la pose de la couche de base, et cela en tenant compte des dommages supplémentaires causés durant cette année où la chaussée est mise en service avant qu'elle ne soit achevée.

Ce point est un paramètre important dans notre choix du logiciel, car cette situation peut se présenter, même si nous ne préconisons pas de reporter le pavage de la couche de roulement à l'année suivante. Mais des contraintes indépendantes de notre volonté, prolonge le délai planifié pour le projet, on peut citer quelques cas, tel que:

- l'émission du certificat d'autorisation du ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP);
- l'obtention de l'approbation des différentes étapes du projet (adoption des règlements, adjudication des contrats...) par les instances de la Ville (conseil de Ville et comité exécutif);
- les contraintes liées au chantier et aux conditions climatiques (pluies abondantes, hiver précoce, etc.).

CHAPITRE 5

CATALOGUE DE DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL DES CHAUSSÉES SOUPLES

5.1 Introduction

Ce catalogue présente les structures de chaussées pré-calculées. Il se présente sous forme de fiches selon la nature du sol support et la classe du trafic et tient compte du gel (et du soulèvement admissible). Ces structures sont calculées à l'aide du logiciel «Chaussée 2» du MTQ pour le dimensionnement structural des chaussées souples, qui est une adaptation de la méthode de l'AASHO aux conditions du Québec.

Il n'y a pas eu une validation de ces structures par une autre méthode, faute de temps. Toutefois, nous estimons que la méthode du MTQ est assez éprouvée et qu'elle répond très bien aux besoins de la Ville en matière de dimensionnement, comme nous l'avons présenté au chapitre précédent.

5.2 Hypothèses et données de calculs

5.2.1 Données climatiques

La station météorologique choisie est la station de Saint-Hubert (*Voir* figure 5.1). Les données climatiques suivantes sont utilisées par le logiciel dans le module «GEL»:

- Température effective pour le module des enrobés : $T_{BB} = 20,5^\circ\text{C}$
- Température moyenne annuelle; $T_{ma} = 5,9^\circ\text{C}$
- Indice de gel normal; $I_{Gn} = 974^\circ\text{C.jours}$
- Écart type sur l'indice de gel; $\sigma_{IG} = 213$, il provient d'une estimation indirecte basée sur l'indice de gel normal (valeur donnée par défaut)
- Indice de gel de conception; $I_G = 1269$
- Indice de gel de surface; $I_{Gs} = 1269$

- Facteur de transfert de chaleur à la surface; $n = I_{Gs} / I_G = 1$

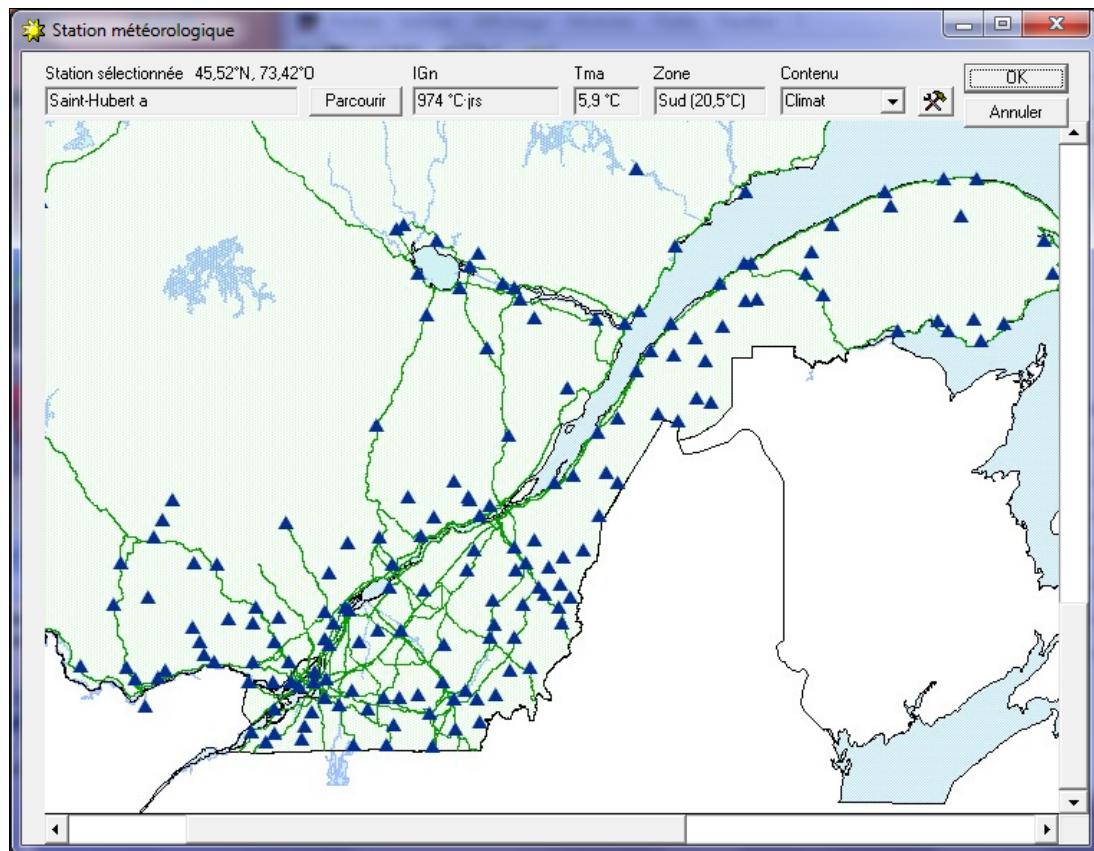


Figure 5.1 Station météorologique de Saint-Hubert.

Ainsi, le dimensionnement structural est réalisé en assurant une protection partielle de l'infrastructure contre le gel en fonction des données météorologiques de la station de Saint-Hubert.

5.2.2 Sol support

Pour le dimensionnement des structures de chaussée, la caractérisation des sols réalisée et présentée au chapitre 3 (*Voir* tableau 3.5) a été arrimée à celle du logiciel «Chaussée 2» comme le résumé le tableau 5.1 ci-dessous:

Tableau 5.1 Classe de sol support

Classe	Nature du sol support		Mr _{effectif}
S1	CH ($I_L < 0,9$)	Argile inorganique de grande plasticité	20
S2	CL $I_p \leq 12$ ($I_L < 0,9$) $I_p > 12$ ($I_L < 0,9$)	Argile inorganique de faible plasticité, argile silteuse, sableuse, graveleuse	36 47
S3	CL, CL-ML ($I_L < 0,9$)	Silt inorganique, poussière de roche, sable très fin silteux ou argileux, de faible plasticité	36
S4	CL, ML, CH, MH, ($I_L \geq 0,9$)	Argile structuré n'ayant jamais subi de cycles de gel-dégel	20
S5	SM .- Fin .- Grossier	Sable argileux, mélange sable argile: .- plus de 30 % passant 80 μm .- moins de 30 % passant 80 μm	45 76
S6	GM, GC	Gravier silteux ou argileux, mélange gravier-sable-silt-argile incluant les Tills	87
S7	Roc brisé		87

5.2.3 Trafic

Le tableau 5.2 ci-dessous résume l'adaptation de la classification fonctionnelle du réseau routier de Longueuil à la classification du trafic du MTQ. On y trouve aussi la durée de vie structurale correspondant à chaque classe ainsi que l'agressivité totale (25 ans) en équivalent de charge axiale simple (ÉCAS).

Tableau 5.2 Données trafic selon la classification fonctionnelle

Classification fonctionnelle	DJMA	% camion	Classe de trafic équivalent MTQ	C.A.M.	ÉCAS (millions)	Durée de vie (ans)
Locale			locale, DJMA projeté			25
	1363	≤ 2 %	> 1000	0.8	0.13	
Collectrice			Collectrice			25
	5017	≤ 5 %	> 3 000	1.2	1.799	
Artère secondaire			National Urbain			25
	Industrielle	10%	> 5000 et < 20000	1.3	7.054	
			National Urbain			
	Autre qu'industrielle	10376	≤ 5 %	> 5000 et < 2000	1.2	3.72
Artère principale			National Urbain		9,366 à	25
	Industrielle	10 à 14 %	< 2000	1.3	13.112	
			National Urbain			
	Autre qu'industrielle	16735	≤ 5%	> 2000	1.2	6.001

5.3 Matériaux

Les matériaux granulaires MG-20, MG-56 et MG-112 devront satisfaire aux exigences de la norme NQ2560-114/2002. Les spécifications de la partie II de cette norme s'appliquent après le transport, la mise en œuvre et le compactage des granulats, conformément aux exigences du cahier des clauses techniques générales (CCTG) de la Ville de Longueuil (version mars 2009).

Le bitume utilisé pour les enrobés doit être conforme aux prescriptions de la norme MTQ 4101. Les granulats utilisés pour les enrobés doivent être conformes aux prescriptions des normes NQ2560-114 et MTQ4201 (*Voir* tableau 5.3).

Seuls les matériaux neufs sont permis dans les enrobés bitumineux (CCTG, 2009). Le liant d'accrochage (émulsion de bitume RS-1) doit être conforme aux prescriptions de la norme MTQ4105.

Tableau 5.3 Prescription pour les enrobés bitumineux
Tiré de CCTG (2009, p. 32)

Classification fonctionnelle	DJMA	Couche de roulement			Couche de base				
		Bitume PG	Gros granulats	granulats fins	Bitume PG	Gros granulats	granulats fins		
Locale & collectrice	< 5 000	64-28	3	c	2	58-28	3	c	2
Artère (secondaire ou principale)	> 5 000 < 20 000	64-28 70-28*	2	a	1	58-28 64-28*	2	c	2
(*) Réseau d'autobus, artères à vocation industrielle et agricole									

Les matériaux recyclés MR-5, MR-1 et MR-2 doivent satisfaire aux exigences de la norme NQ2560-60.

Le géotextile (polyester ou polypropylène) doit être conforme aux prescriptions de la norme MTQ13.101. Il doit être non tissé et aiguilleté de type III (CCTG, 2009).

5.4 Démarche de détermination d'une structure de chaussée

La démarche de détermination d'une structure de chaussée est la suivante:

- Déterminer la catégorie de la voie et la classe de trafic en choisissant le type de route et la classe de DJMA afin de définir les objectifs de performance, comme il a été fait et présenté au tableau 5.2.
- Choisir la station météorologique.
- Choisir la plate-forme support de la chaussée.
- Choisir la composition de la couche de surface, soit le type de revêtement bitumineux (BB, BB HRO,...).
- Sélectionner les couches de fondation et de sous-fondation.
- Faire les vérifications au gel afin de limiter le soulèvement au gel sous du seuil admissible en augmentant si requis l'épaisseur d'une des couches de la structure de chaussée.

- Faire les vérifications au gel (1994), toujours en ajustant au besoin les épaisseurs de la structure de chaussée.
- Vérifier que la structure de chaussée ainsi obtenue respecte toutes les exigences, à la fois pour l'analyse structurale et l'analyse du gel.
- Mettre en concurrence des structures d'épaisseurs différentes en utilisant différents matériaux de construction (recyclage ...).

5.4.1 Exemple d'application

Objectif

Type de route : Locale

Classe de trafic : DJMA projeté > 1000

Prévision du trafic :

DJMA (de comptage) = 1363, année 2008

DJMA actualisé = 1446, année du projet 2011

Durée de vie = 25 ans

g = 3% , fa = 36,46, Njrs = 300

Agressivité du trafic : proportion de véhicule lourd, %PL = 2%

Coefficient d'agressivité moyen (valeur par défaut), C.A.M = 0,8

Répartition du trafic lourd sur les voies = 100%

Nombre de voies par direction = 1 voie

Direction1 :

Fraction du trafic en direction 1 = 50 %

Fraction du trafic en direction 2 = 50 %

Voie de référence : Voie max, fraction par voie : 100%, trafic par voie (DJMA) = 1054, FS= 1, ÉCAS par voie (millions) = 0,127.

DJMA_{projeté} = 2 109, ÉCAS_{projeté} (millions) = 0,127

Climat

Station de Saint-Hubert, voir «données climatiques», article 5.2.1.

Choix de la structure

- Sol support; argile inorganique de grande plasticité, CH (IL < 0,9), classe S1.
- Option de structures proposées (voir fiche).
- Données structurales de calcul.
- $FMr=1$, $Mr_{\text{effective}}=20$. Le logiciel affiche le facteur d'ajustement saisonnier proposé ainsi que la conversion du $Mr_{\text{effective}}$ du sol support en valeur maximale d'été avec l'indice CBR et la résistance de cisaillement correspondant, dans ce cas $FAS=0.65$, $M_{\text{effective}}=31 \text{ MPa}$, $CBR=3,5$ et $Cu=105 \text{ KPa}$.
- Erreur standard et fiabilité; $S_0=0,45$, $R=70\%$, $Z_R=0,524$.
- Indice de viabilité; $PSIi=3,75$, $PSIf=1,75$, $\Delta PSI=2$.
- Vérification au gel; soulèvement maximal acceptable; $h=0,07$, $z(m)=1630$, $h=0,057$.
- Gel (1994); épaisseur totale requise, 785 mm.

5.5 Structures de chaussée selon la classification fonctionnelle

Pour chaque classe fonctionnelle du réseau routier, la procédure de dimensionnement structural est résumée sous forme de tableau, de même que les résultats du dimensionnement, qui sont fournis sous forme de structures types.

5.5.1 Structures types pour les rues locales

À la classe fonctionnelle «rues locales» correspond un seul niveau de trafic (0,129 million d'ÉCAS). Les structures de chaussée proposées sont également adaptées à un trafic d'au plus 0,129 million d'ÉCAS.

Tableau 5.4 Paramètres et hypothèses de conception pour les rues locales

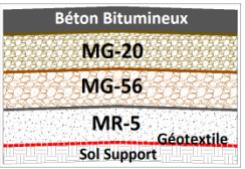
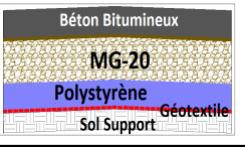
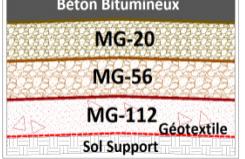
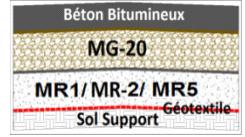
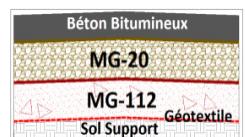
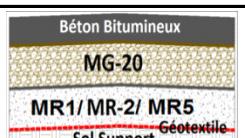
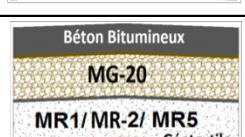
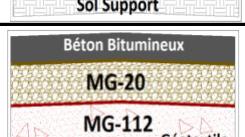
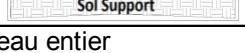
Paramètres et hypothèses de conception	Valeur utilisée
Classification fonctionnelle	locale
Nombre de voies par direction	1
Volume du trafic (DJMA total -2 directions)	1363
Pourcentage de poids lourds	2%
Facteur d'agressivité moyen	0,8
So (erreur standard associée à la mesure ou à l'estimation des paramètres de conception)	0,45
R (fiabilité...)	70%
Indice de viabilité	$\text{PSI}_{\text{initial}} = 3,75$ $\text{PSI}_{\text{final}} = 1,75$
Proportion de PL par voie dans la direction de conception	100%
Taux d'accroissement annuel	3%
Durée de vie structurale	25 ans
DJMA projeté	2109
Agressivité totale- durée de vie 25 ans; Équivalent de Charge Axiale Simple (ÉCAS)	0,129 (millions)

Tableau 5.5 Structures types pour les rues locales

Sol support	Structure proposée	Épaisseur des couches	
		mm	mm (1)
S1; CH, $I_L < 0,9$		90 200 500 1	idem
		90 200 500 1	idem
S2; CL, $I_p \leq 12$, ($IL \leq 0,9$)		100 200 325 450 1	idem
		100 200 325 600 (*) 1	idem
S2; CL, $I_p > 12$, ($IL \leq 0,9$)		100 200 500 1	idem
		100 300 600 (*) 1	idem
S3; ML, ML-CL ($IL \leq 0,9$)		100 250 475 600 1	idem
		100 200 50 1	idem
		100 250 600 600 1	idem

(*) MG112 fuseau entier

Tableau 5.5 Structures types pour les rues locales (suite)

Sol support	Structure proposée	Épaisseur des couches	
		mm	mm (1)
S4; CL, ML, CH, MH (IL≥ 0,9)		100 300 550 600 1	idem
		100 350 63 1	idem
		100 300 600 950(*) 1	idem
S5; SM fin		90 200 450 1	idem
		90 250 450 1	idem
S5; SM Grossier		90 200 400 1	idem
		90 200 400 1	idem
		90 200 300 1	idem
S6; GM, GC et		90 200 300 1	idem
S7; Roc brisé		90 200 300 1	idem
(*) MG112 fuseau entier			

5.5.2 Structures types pour les rues collectrices

À la classe fonctionnelle « rues collectrices » correspond un seul niveau de trafic (1,799 million d'ÉCAS). Les structures de chaussée proposées sont également adaptées à un trafic d'au plus égal à 1,799 million d'ÉCAS.

Tableau 5.6 Paramètres et hypothèses de conception pour les rues collectrices

Paramètres et hypothèses de conception	Valeur utilisée
Classification fonctionnelle	Collectrice
Nombre de voies par direction	100 %
Volume du trafic (DJMA Total -2 directions)	5017
Pourcentage de poids lourds	5 %
Facteur d'agressivité moyen	1,2
So (erreur standard associée à la mesure ou à l'estimation des paramètres de conception)	0,45
R (fiabilité...)	80%
Indice de viabilité	PSI _{initial} = 4 PSI _{final} = 2
Proportion de PL par voie dans la direction de conception	1
Taux d'accroissement annuel	3 %
Durée de vie structurale	25 ans
DJMA projeté	7995
Agressivité totale- durée de vie 25 ans; Équivalent de charge axiale simple (ÉCAS)	1,799 (millions)

Tableau 5.7 Structures types pour les rues collectrices

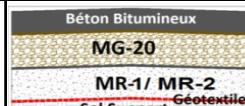
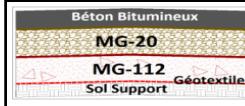
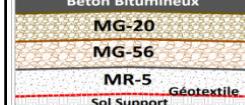
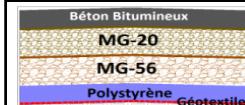
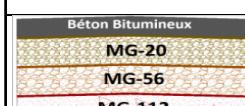
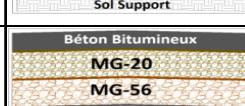
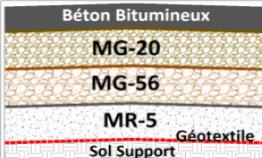
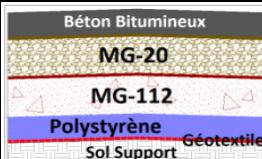
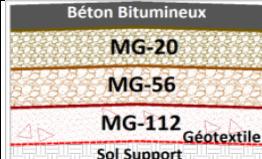
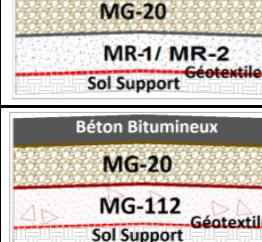
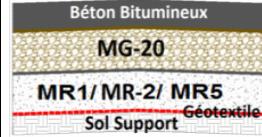
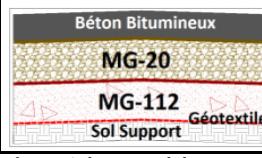
Sol support	Structure proposée	Épaisseur des couches	
		mm	mm (1)
S1; CH, $(I_L < 0,9)$		135 250 600 1 1	145 250 600 1
		135 250 550(*) 1	145 250 550(*) 1
S2; CL, $I_p \leq 12$, $(I_L \leq 0,9)$		135 250 275 500 1	145 250 275 500 1
		135 200 225 25(***) 1	145 200 225 25(***) 1
S2; CL, $I_p > 12$, $(I_L \leq 0,9)$		135 200 200 400 1	145 200 200 400 1
		135 375 25(*) 1	145 375 25(*) 1
S3; ML, ML-CL ($I_L \leq 0,9$)		135 200 225 38 1	145 200 225 38 1
		135 300 500 600 1	145 300 500 600 1
		135 300 600 600 1	145 300 600 600 1
(*) MG112 excluant les sables mal gradués "SP"			
(**) MG112 fuseau entier			
(***) polystyrène extrudé			

Tableau 5.7 Structures types pour les rues collectrices (suite)

Sol support	Structure proposée	Épaisseur des couches	
		mm	mm (1)
S4; CL, ML, CH, MH (IL≥ 0,9)		135	145
		325	325
		600	600
		600	600
		1	1
		135	145
		300	300
		500(*)	500(*)
		75	75
S5; SM fin et SM Grossier		135	145
		350	350
		600	600
		850(**)	850(**)
		1	1
		135	145
		250	250
		325	325
		1	1
S6; GM, GC et		135	145
		225	225
		300	300
		1	1
S7; Roc brisé		135	145
		225	225
		300	300
		1	1
(*) MG112 excluant les sables mal gradués ``SP``			
(**) MG112 fuseau entier			

5.5.3 Structures types pour les artères secondaires

À la classe fonctionnelle «artères secondaires» correspondent deux niveaux de trafic T1 (3,72 millions d'ÉCAS) et T2 (7,054 millions d'ÉCAS). Les structures de chaussée proposées sont également adaptées à un trafic d'au plus égal à 3,72 millions d'ÉCAS pour la classe T1 et compris entre] 3,72; 7,054] millions d'ÉCAS pour la classe T2.

Tableau 5.8 Paramètres et hypothèses de conception pour les artères secondaires

Paramètres et hypothèses de conception	Trafic T1	Trafic T2
	Valeur utilisée	Valeur utilisée
Classification fonctionnelle	Artère secondaire (Nationale/Urbaine)	Artère secondaire (Nationale/Urbaine)
Nombre de voies par direction	1	1
Volume du trafic (DJMA Total -2 directions)	10367	9352
Pourcentage de poids lourds	5%	10%
Facteur d'agressivité moyen	1,2	1,3
So (erreur standard associée à la mesure ou à l'estimation des paramètres de conception)	0,45	0,45
R (fiabilité...)	85%	85%
Indice de viabilité	PSI _{initial} = 4,25 PSI _{final} = 2,25	PSI _{initial} = 4,25 PSI _{final} = 2,25
Proportion de PL par voie dans la direction de conception	100%	100%
Taux d'accroissement annuel	3%	3%
Durée de vie structurale	25 ans	25 ans
DJMA projeté	16535	14469
Agressivité totale- durée de vie 25 ans; Équivalent de charge axiale simple (ÉCAS)	3,72 (millions)	7,054 (millions)

Tableau 5.9 Structures types pour les artères secondaires

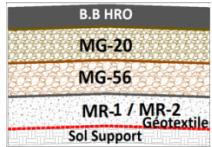
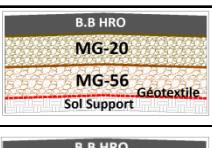
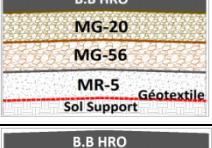
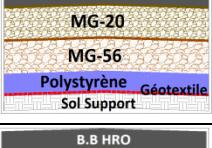
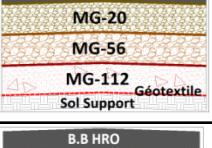
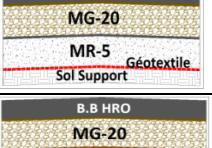
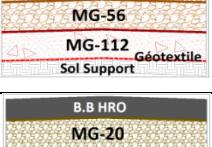
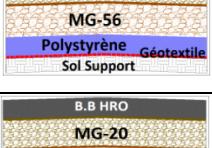
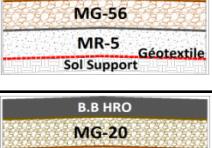
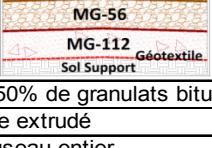
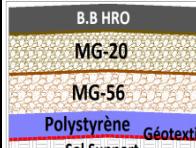
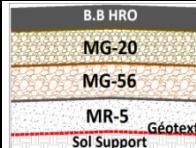
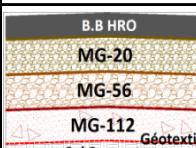
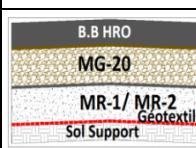
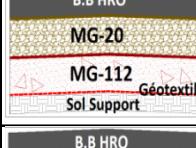
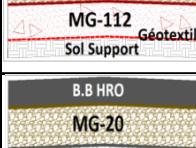
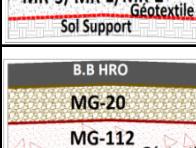
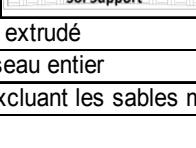
Sol support	Structure proposée	Trafic T1		Trafic T2	
		Épaisseur des couches		Épaisseur des couches	
		mm	mm (1)	mm	mm (1)
S1; CH, (IL < 0,9)		150	160	170	180
		200	200	250	250
S2; CL, Ip ≤ 12, (IL □ 0,9)		275	275	300	300
		400	400	400	400
S2; CL, Ip > 12, (IL □ 0,9)		1	1	1	1
		150	160	170	180
S3; ML, ML-CL (IL □ 0,9)		200	200	250	250
		275	275	275	275
S3; ML, ML-CL (IL □ 0,9)		50(*)	50(*)	38(*)	38(*)
		1	1	1	1
(*) MR5 avec 50% de granulats bitumineux					
(**) Polystyrène extrudé					
(***) MG112 fuseau entier					

Tableau 5.9 Structures types pour les artères secondaires (suite)

Sol support	Structure proposée	Trafic T1		Trafic T2		
		Épaisseur des couches		Épaisseur des couches		
		mm	mm (1)	mm	mm (1)	
S4; CL, ML, CH, MH ($IL \geq 0,9$)		150	160	170	180	
		250	250	250	250	
		500	500	525	525	
		38(*) 1	38(*) 1	38(*) 1	38(*) 1	
		150	160	170	180	
		350	350	250	250	
		600	600	525	525	
		600 1	600 1	600 1	600 1	
		150	160	170	180	
		350	350	250	250	
		600	600	550	550	
		825(**) 1	825(**) 1	1000(**) 1	1000(**) 1	
S5; SM fin		150	160	170	180	
		225	225	250	250	
		500	500	575	575	
		1	1	1	1	
		150	160	170	180	
		250	250	250	250	
		475	475	575(*)	575(*)	
		1	1	1	1	
S5; SM Grossier		150	160	170	180	
		200	200	250	250	
		525	525	450	450	
		1	1	1	1	
		150	160	170	180	
		200	200	250	250	
		525(***) 1	525(***) 1	450 1	450 1	
S6; GM, GC et		150	160	170	180	
		200	200	200	200	
		375	375	375	375	
		1	1	1	1	
S7; Roc brisé		150	160	170	180	
		250	250	275	275	
		325	325	300	300	
		1	1	1	1	
(*)Polystyrène extrudé						
(**) MG112 fuseau entier						
(***) MG112 excluant les sables mal gradués "SP"						

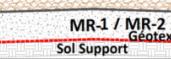
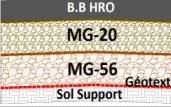
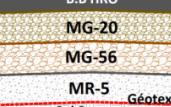
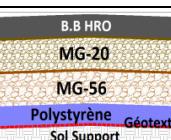
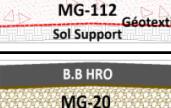
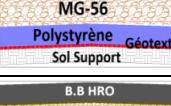
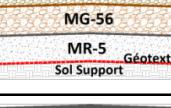
5.5.4 Structures types artères principales

À la classe fonctionnelle «artères principales» correspondent trois niveaux de trafic T1 (3,72 millions d'ÉCAS), T2 (7,054 millions d'ÉCAS) et T3 (7,054 millions d'ÉCAS). Les structures de chaussée proposées sont également adaptées à un trafic d'au plus égal à 6,001 millions d'ÉCAS pour la classe T1, est compris entre] 6,001; 9,366] millions d'ÉCAS pour la classe T2 et compris entre] 9,366; 13,112] millions d'ÉCAS pour la classe T3.

Tableau 5.10 Paramètres et hypothèses de conception pour les artères principales

Paramètres et hypothèses de conception	Trafic T1	Trafic T2	Trafic T3
	Valeur utilisée	Valeur utilisée	Valeur utilisée
Classification fonctionnelle	Artère secondaire (Nationale/Urbaine)	Artère secondaire (Nationale/Urbaine)	Artère secondaire (Nationale/Urbaine)
Nombre de voies par direction	1	1	1
Volume du trafic (DJMA Total -2 directions)	16735	12056	12056
Pourcentage de poids lourds	5%	10%	14%
Facteur d'agressivité moyen	1,2	1,3	1,3
So (erreur standard associée à la mesure ou à l'estimation des paramètres de conception)	0,45	0,45	0,45
R (fiabilité...)	85%	85%	85%
Indice de viabilité	PSI _{initial} = 4,25 PSI _{final} = 2,25	PSI _{initial} = 4,25 PSI _{final} = 2,25	PSI _{initial} = 4,25 PSI _{final} = 2,25
Proportion de PL par voie dans la direction de conception	100%	100%	100%
Taux d'accroissement annuel	3%	3%	3%
Durée de vie structurale	25 ans	25 ans	25 ans
DJMA projeté	26669	19212	19212
Agressivité totale- durée de vie 25 ans; Équivalent de charge axiale simple (ÉCAS)	6,001 (millions)	9,366 (millions)	13,112 (millions)

Tableau 5.11 Structures types pour les artères principales

Sol support	Structure proposée	Trafic T1		Trafic T2		Trafic T3	
		Épaisseur des couches		Épaisseur des couches		Épaisseur des couches	
		mm	mm (1)	mm	mm (1)	mm	mm (1)
S1; CH, ($IL < 0,9$)		180	190	180	190	195	200
		200	200	200	200	200	200
		350	350	350	350	350	350
		325	325	400	400	425	425
		1	1	1	1	1	1
		180	190	180	190	195	200
		250	250	250	250	225	225
		575	575	575	575	575	575
S2; CL, $Ip \leq 12$, ($IL < 0,9$)		180	190	180	190	195	200
		200	200	200	200	225	225
		300	300	300	300	300	300
		525	525	525	525	500	500
		1	1	1	1	1	1
		180	190	180	190	195	200
		250	250	200	200	225	225
		300	300	325	325	325	325
S2; CL, $Ip > 12$, ($IL < 0,9$)		180	190	180	190	195	200
		250	250	200	200	225	225
		300	300	350	350	300	300
		650	650	650(**)	650(**)	675(*)	675(*)
		1	1	1	1	1	1
		180	190	180	190	195	200
		200	200	200	200	200	200
		200	200	200	200	225	225
S3; ML, ML-CL ($IL < 0,9$)		180	190	180	190	195	205
		200	200	225	225	225	225
		275	275	300	300	300	300
		38(*)	38(*)	38(*)	38(*)	50(*)	50(*)
		1	1	1	1	1	1
		180	190	180	190	195	200
		250	250	225	225	225	225
		575	575	600	600	575	575
		600	600	600	600	600	600
		1	1	1	1	1	1
		180	190	180	190	195	200
		250	250	225	225	250	250
		300	300	600	600	600	600
		975(**)	975(**)	600(**)	600(**)	625(**)	600(**)
		1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1

(*) polystyrène extrudé

(**) MG112 fuseau entier

Tableau 5.11 Structures types pour les artères principales (suite)

Sol support	Structure proposée	Trafic T1		Trafic T2		Trafic T3	
		Épaisseur des couches		Épaisseur des couches		Épaisseur des couches	
		mm	mm (1)	mm	mm (1)	mm	mm (1)
S4; CL, ML, CH, MH (IL ≥ 0,9)		180	190	180	190	195	200
		225	225	225	225	200	200
		525	525	575	600	600	600
		38(*)	38(*)	38(*)	38(*)	38(*)	38(*)
		1	1	1	1	1	1
		180	190	180	190	195	200
		300	300	325	325	300	300
		600	600	600	600	600	600
		600	600	600	600	600	600
S5; SM fin		180	190	180	190	195	200
		375	375	300	300	300	300
		600	600	550	550	600	600
		725	725	900	900	800	800
		1	1	1	1	1	1
		180	190	180	190	195	200
		225	225	225	225	225	225
		600	600	600	600	600	600
		1	1	1	1	1	1
S5; SM Grossier		180	190	180	190	195	200
		200	200	200	200	200	200
		475	475	475	475	475	475
		1	1	1	1	1	1
		180	190	180	190	195	200
		200	200	200	200	200	200
		475(**)	475(**)	475(**)	475(**)	450(**)	450(**)
		1	1	1	1	1	1
S6; GM, GC et		180	190	180	190	195	200
		200	200	200	200	200	200
		350	350	350	350	350	350
		1	1	1	1	1	1
S7; Roc brisé		180	190	180	190	195	200
		200	200	200	200	200	200
		350(**)	350(**)	350(**)	350(**)	350(**)	350(**)
		1	1	1	1	1	1

(*) Polystyrène extrudé

(**) MG112 excluant les sables mal gradués "SP"

(***) MR5 avec 40% de granulats bitumineux

5.6 Conclusion

Le catalogue de dimensionnement structural de chaussées souples donne, selon la classe fonctionnelle et le niveau de trafic qui lui correspond, des options de structures pour chaque sol support.

Les structures proposées sont données par ordre croissant du coût de réalisation estimé par le logiciel. Dans la plupart des cas, les structures proposées ont un coût sensiblement égal.

Il est proposé, à chaque fois que cela est possible, une structure avec matériaux neufs et avec matériaux recyclés pour permettre le choix selon la disponibilité des matériaux. Il est aussi proposé une structure type correspondant au cas où la pose de la couche de surface (50 mm de pavage) serait reportée à l'année suivant la pose de la couche de base (pavage en parachèvement).

Dans le cas des sols de classe S3 et S4, il est d'abord proposé la structure de chaussée la plus appropriée (protection au polystyrène). Les autres structures proposées sont données à titre indicatif. L'épaisseur totale de ces couches variera entre 1,6 et 1,9 mètre, ce qui n'est pas envisageable comme solution en milieu municipal. Il n'est pas recommandé de construire sur ces types de sols, qui sont très gélifs. À titre d'exemple, le sol S4 (CL, ML, CH, ML avec $IL>0,9$) est extrêmement gélif, car il possède une micro-structure vierge n'ayant jamais été altérée par les effets climatiques. Par conséquent, l'épaisseur de ce sol qui gèle et dégèle pour la première fois subira des tassements pouvant aller jusqu'à 50 %. L'exposition au gel avant construction est une solution, car le SP (potentiel de ségrégation) peut diminuer de 50 à 75 % après les premiers cycles de gel-dégel (St-Laurent, 2006). Dans ce cas, il faut prévoir le déneigement de la surface en question afin de permettre au gel de pénétrer profondément. Une autre solution existe, comme nous l'avons mentionné plus haut. Il s'agit de l'isolation au polystyrène qui procure une protection totale contre le gel.

CHAPITRE 6

CAS PARTICULIER : CHAUSSÉES RIGIDES

6.1 Introduction

Ce chapitre présente le dimensionnement structural des chaussées rigides pour les cas particuliers que sont les chaussées en zone industrielle, les voies, ou arrêts d'autobus, et les intersections fortement sollicitées par le passage des véhicules lourds. La méthode AASHTO 1993 ainsi que le logiciel *WinPas* sont utilisés pour le dimensionnement des structures types et sont présentés dans ce qui suit avec les hypothèses et les données nécessaires pour le catalogue.

6.2 Méthode AASHTO 1993

Le guide AASHTO a été modifié à plusieurs reprises pour le dimensionnement structural des chaussées rigides. Les principales améliorations sont l'introduction :

- du coefficient de drainage;
- du facteur de fiabilité;
- du module de résilience du sol.

La version la plus utilisée est celle de 1993 et comme pour les chaussées souples l'équation de base, pour le dimensionnement des chaussées rigides, est basée sur une corrélation statistique. Elle se présente ainsi :

$$\log_{10}(w_{10}) = Z_R * S_0 + 7.35 * \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10}[\frac{S_{f1}}{1.48 - 1.6}]}{1 + \frac{0.004 \cdot 10^6}{(D + 1)^{0.46}}} +$$
$$(4.22 - 0.32PSI_f) * \log_{10}[S_f * C_d * \frac{(D^{0.71} - 1.182)}{213.63 \cdot D^{0.71} - 18.42 \cdot (\frac{K_f}{S_f})^{0.56}}]$$

(5.1)

- W_{18} : nombre total admissible de passages d'essieux équivalent à un essieu simple à roues jumelées de 8 165 kg (18 000 lb)
- S_0 : erreur standard de l'estimation, incluant la dispersion de toutes les données (matériaux, trafic, chantier, drainage, modèle, etc.)
- Z_R : déviation normale associée à la fiabilité R retenue
- R : niveau de confiance ou fiabilité. Il représente la probabilité que la chaussée présente un niveau de qualité supérieur ou égal à celui visé à la fin de la période de conception
- PSI: indice de viabilité de la chaussée. C'est un indice de qualité globale de la chaussée qui varie entre 0 et 5. Le Δ PSI est la différence entre une chaussée neuve et une chaussée détériorée
- K : module de réaction du sol support
- C_D : coefficient de drainage
- S_c : module de rupture du béton
- E_c : module élastique du béton
- J : coefficient de transfert de la charge
- D : épaisseur de la dalle

6.3 Les variables de conception

Les variables de conception pour chaussée rigide dans la méthode AASHTO sont:

6.3.1 Vie utile ou période de performance

Il s'agit du temps écoulé avant la première réhabilitation d'une chaussée neuve ou entre deux grandes opérations de réhabilitation. Elle dépend de plusieurs facteurs, à savoir la classification de la chaussée, l'intervention, la nature d'entretien et les fonds disponibles s'il s'agit d'une chaussée neuve.

6.3.2 Période d'analyse

La période d'analyse est le temps fixé pour obtenir une meilleure utilisation de la chaussée. elle inclut tout le temps d'essai de la chaussée, y compris les réhabilitations. Cette période est en général supérieure au temps de performance.

Le tableau suivant indique les temps d'analyse suggérés par l'AASHTO en fonction de la nature de la route:

Tableau 6.1 Période d'analyse
Tiré du guide (AASHTO, 1993)

Nature de la route	Période d'analyse
Urbaine (circulation dense)	30-50
Rurale (circulation dense)	20-50
Dalle, revêtement bitumineux (circulation faible)	15-25

6.3.3 Trafic

La procédure de conception, est basée sur l'équivalent de charge axiale simple (ÉCAS). Ainsi, le trafic total doit être ramené au nombre de passages de l'essieu de référence cumulatif durant la période de conception.

6.3.4 Fiabilité

La fiabilité (R) est la probabilité, ou l'assurance, que le niveau de servabilité de la chaussée ou de la section de chaussée soit maintenu durant sa vie utile.

Le choix du niveau de fiabilité dépend de l'ensemble des facteurs qui interviennent dans l'équation de la conception, à savoir les indices de servabilité, le climat, le module de résilience, la portance du sol, les coefficients de drainage, l'épaisseur de la fondation, et du trafic. Ainsi, la fiabilité est fonction de l'écart type global S_0 qui tient compte des variations du trafic prévu et des facteurs de performance. S_0 représente la dispersion des données prédictes par rapport aux données de comportement constatées.

Dans sa version de 1993, le guide AASHTO recommande une valeur de S_0 entre 0.34 et 0.39 pour la conception des chaussées rigides.

Selon la méthode AASHTO, pour un niveau de fiabilité donné, la courbe de conception sera décalée de la courbe de comportement par une valeur égale à S_0 multipliée par l'écart type normal (Z_R).

6.3.5 Module de réaction du sol K

Le module de réaction du sol K est la résistance du sol support (infrastructure) ou de la fondation. Elle traduit la qualité du support offert pour la dalle de béton. Le module K est exprimé en MPa. Il est déterminé par la charge en MPa/m sur une plaque de 760 mm de diamètre, divisée par la flexion, en mm, provoquée par cette charge.

6.4 Logiciel *WinPas*

WinPas (*Pavement Analysis Software*) est un logiciel de calcul de l'épaisseur de chaussée rigide développé par l'ACPA (*American Concrete Pavement Association*). Ce logiciel utilise la version de 1993 du guide AASHTO pour le dimensionnement structural des chaussées. Pour les chaussées rigides, le logiciel nécessite de définir les différents paramètres suivants:

- la résistance à la flexion (module de rupture M_f);
- la résistance de l'infrastructure ou de la fondation (module de réaction du sol K);
- le débit de circulation des camions et la distribution des charges axiales;

- la période de dimensionnement (30 ans).

6.5 Hypothèses et données de conception

Les principaux facteurs à considérer pour le dimensionnement d'une chaussée en béton sont le trafic (circulation, débit et charges axiales), l'infrastructure (sol support) et la fondation, la qualité du béton, le calcul de l'épaisseur de la dalle, les joints et les spécifications de construction.

6.5.1 Trafic

En l'absence de données précises, tel que mentionné à l'article 3.4.4, la procédure sera la même que celle pour la partie chaussée souple présentée au chapitre 5 (voir tableau 5.2). Par conséquent, une approche pratique de dimensionnement structural pour chaussées rigides est de se référer à la classification préétablie selon le débit journalier moyen annuel de camions, comme présenté au tableau 6.2.

Tableau 6.2 Classe de trafic

Classe	ÉCAS en millions		R %
	Chaussée souple	Chaussée rigide	
T ₁	≥ 3,72	5 à 5,58	50%
T ₂	3,72 à 6,001	5,58 à 9,002	60%
T ₃	6,001 à 7,052	9,002 à 10,578	70%
T ₄	7,052 à 9,366	10,578 à 14,050	70%
T ₅	9,366 à 13,112	14,050 à 19,668	80%

Le dimensionnement est réalisé à partir des limites supérieures de chaque classe de trafic. La Ville retient les indices de fiabilité (R%) variant selon l'importance du rôle fonctionnel de la chaussée, comme présenté au tableau 6.1.

6.5.2 Viabilité

Le niveau de service d'une chaussée se mesure par son indice de viabilité (PSI) qui varie entre 0 (pour une mauvaise chaussée) et 5 (pour une chaussée parfaite).

La sélection de la valeur finale de PSI est basée sur la moindre valeur tolérable avant toute grande intervention ou reconstruction.

Un indice de servibilité final de 2,5 ou plus est suggéré pour la conception de la majeure partie des chaussées à haut trafic. Cet indice peut être pris égal à 2 pour un faible trafic. Pour le PSI initial (qui représente le niveau de confort de la chaussée immédiatement après la construction), l'AASHTO a recommandé une valeur de 4,5 pour les chaussées rigides. la variation, ou perte de la viabilité, est déterminée par l'équation $\Delta\text{PSI} = \text{PSI}_i - \text{PSI}_f$

La Ville de Longueuil adopte, selon la classe de la voirie urbaine, les indices de viabilité initiale et finale indiqués au tableau 6.3.

Tableau 6.3 Indice de viabilité

Classe	Chaussée rigide	
	PSI _i	PSI _f
T ₁	4	2
T ₂	4	2
T ₃	4	2
T ₄	4	2
T ₅	4	2

6.5.3 Infrastructure et fondation

La pression sous les dalles en béton au passage des charges roulantes est largement répartie et la déformation qui en résulte est faible et très étalée (voir figure2.3). Ainsi, les pressions au sol ne sont pas dangereuses, mais les flexions dans la dalle peuvent provoquer sa rupture.

Aussi, pour que la dalle en béton offre une bonne performance, il faut que le sol support ou l'infrastructure soit bien nivelé et compacté pour le rendre uniforme afin d'éviter tout changement abrupt qui pourrait causer un comportement différentiel et affecter la performance de la dalle.

La susceptibilité du sol support au gel peut aussi affecter la performance de la dalle. À cet effet, le logiciel «Chaussée 2» est utilisé pour la détermination de l'épaisseur totale de la structure de la chaussée rigide (fondation granulaire et dalle de béton) nécessaire en fonction du critère de soulèvement au gel maximum admissible. Le logiciel *WinPas* donne l'épaisseur de la dalle avec une couche de fondation granulaire (MG-20, 250mm) selon la classe du trafic et la classe du sol support.

La classe de sol support est définie précédemment et résumée au tableau 5.1 pour le dimensionnement des chaussées souples. Néanmoins pour le cas des chaussées rigides, les sols de type S_3 et S_4 ne sont pas considérés puisqu'il n'est pas recommandé de construire sur ces sols considérés très gélifs. Aussi le tableau suivant donne la classe de sol considérée pour le dimensionnement des chaussées rigides.

Tableau 6.4 Classe de sol support (révisé)

Classe	Description	Mr
S_1	CH ($I_L < 0,9$)	20
$S_2 (1)$	CL, $I_p \leq 12$ ($I_L < 0,9$)	36
$S_2 (2)$	CL, $I_p > 12$ ($I_L < 0,9$)	45
$S_5 (1)$	SM, sable fin	45
$S_5 (2)$	SM, sable grossier	76
S_6 et S_7	GM, GC, roc brisé	87

6.5.4 Module de rupture du béton

Le module de rupture est la résistance en flexion du béton. Il s'agit du facteur qui contrôle le dimensionnement de la dalle. Comme le critère principal de conception est la fatigue en flexion, il faut que le module de rupture du béton résiste à la fissuration due à la fatigue par flexion. Généralement, le module de rupture utilisé est de 5 MPa.

Le béton de la dalle doit résister aux cycles de gel-dégel ainsi qu'aux effets du sel de déglaçage. Il est important que le mélange du béton respecte la norme CSA A23.2-8C. Le mélange de béton doit avoir un faible rapport eau/liants, une teneur en ciment adéquate, une teneur en air entraîné suffisante et une cure satisfaisante.

6.5.5 Démarche de détermination de l'épaisseur de la dalle

La démarche de détermination d'une structure de chaussée avec le logiciel *WinPas* est décrite dans cet exemple d'application et selon la figure 6.1. Le détail des calculs du logiciel est donné à l'annexe XIV (p. 129-130):

- Pour la classe T4 = 14,049 millions d'ÉCAS, et R= 70 % (Fiabilité)
- Pour la classe de sol S6 et S7 avec $M_r = 87$ (MPa)
- Coefficient de transfert de la charge, $J = 3,6$
- Module de rupture du béton 5 (MPa)
- Module élastique $E_c = 6,750 * S_c = 33\ 750$ (MPa)
- Pour un sol support de 87 (MPa) et une couche de fondation granulaire (MG-20) de 250 mm, $K = 182,4$ (MPa/m)
- Coefficient de drainage $C_D = 0,8$.

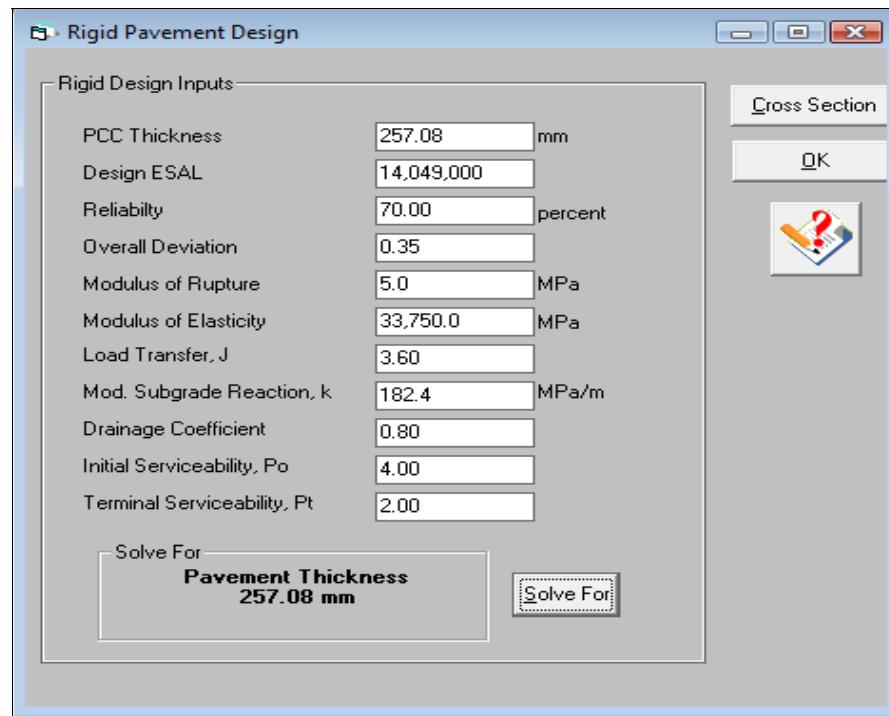


Figure 6.1 Interface pour le dimensionnement de chaussées rigides du logiciel *WinPas*.

6.6 Structures types

Les résultats sont fournis sous forme de fiche de structures types de chaussées rigides, après avoir réalisé l'ensemble des calculs de dimensionnement structural et arrimé le tout selon les pratiques de la Ville.

Le dimensionnement est réalisé pour les différentes classes de portance du sol support, en fonction du trafic cumulé, comme présenté au tableau 6.5. Les épaisseurs calculées sont corrigées pour tenir compte de la sécurité pour la mise en œuvre (arrondi de 8 à 10 mm).

Tableau 6.5 Structures types en béton de ciment

Sol	S1		S2₍₁₎		S2₍₂₎	
Mr	20 (MPa)		36 (MPa)		45 (MPa)	
K	42 (MPa/m)		75,5 (MPa/m)		94,3 (MPa/m)	
T1	Dalle de Béton	240	Dalle de Béton	235	Dalle de Béton	225
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MR-5	375	MG-56	300	MG-56	275
	Géotextile	1	MR-5	450	MR-5	475
	Sol Support		Sol support	1	Sol support	1
	Dalle de Béton	240	Dalle de Béton	235	Dalle de Béton	225
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MG-112	600	MG-56	300	MG-56	300
T2	Géotextile	1	MG-112	600	MG-112	600
	Sol Support		Sol Support	1	Sol Support	1
	Dalle de Béton	265	Dalle de Béton	255	Dalle de Béton	250
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MR-5	375	MG-56	300	MG-56	275
	Géotextile	1	MR-5	425	MR-5	450
	Sol Support		Sol support	1	Sol support	1
	Dalle de Béton	265	Dalle de Béton	255	Dalle de Béton	250
T3	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MG-112	550	MG-56	275	MG-56	275
	Géotextile	1	MG-112	600	MG-112	600
	Sol Support		Sol Support	1	Sol Support	1
	Dalle de Béton	280	Dalle de Béton	270	Dalle de Béton	260
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MR-5	350	MG-56	250	MG-56	250
	Géotextile	1	MR-5	450	MR-5	475
T4	Sol Support		Sol support	1	Sol support	1
	Dalle de Béton	290	Dalle de Béton	285	Dalle de Béton	275
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MR-5	350	MG-56	250	MG-56	250
	Géotextile	1	MR-5	450	MR-5	450
	Sol Support		Sol support	1	Sol support	1
	Dalle de Béton	290	Dalle de Béton	285	Dalle de Béton	275
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
T5	MG-112	525	MG-56	250	MG-56	250
	Géotextile	1	MG-112	575	MG-112	600
	Sol Support		Sol Support	1	Sol Support	1
	Dalle de Béton	315	Dalle de Béton	310	Dalle de Béton	305
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MR-5	325	MG-56	250	MG-56	250
	Géotextile	1	MR-5	425	MR-5	425
	Sol Support		Sol support	1	Sol support	1
T5	Dalle de Béton	315	Dalle de Béton	310	Dalle de Béton	305
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MG-112	475	MG-56	250	MG-56	250
	Géotextile	1	MG-112	550	MG-112	550
	Sol Support		Sol Support	1	Sol Support	1

Tableau 6.5 Structures types en béton de ciment (suite)

<i>Sol</i>	S5₍₁₎		S5₍₂₎		S6 et S7	
<i>Mr</i>	45 (MPa)		76 (MPa)		87 (MPa)	
<i>K</i>	94,3 (MPa/m)		159,3 (MPa/m)		182,4 (MPa/m)	
T1	Dalle de Béton	225	Dalle de Béton	215	Dalle de Béton	210
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MR-5	600	MR-1/MR-2/MR-5	200	MR-1/MR-2/MR-5	200
	Géotextile	1	Géotextile	1	Géotextile	1
	Sol Support		Sol Support		Sol Support	
	Dalle de Béton	225	Dalle de Béton	215	Dalle de Béton	210
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MG-112	625	MG-112	300	MG-112	300
T2	Géotextile	1	Sol Support	1	Sol Support	1
	Dalle de Béton	250	Dalle de Béton	240	Dalle de Béton	235
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MR-5	475	MR-1/MR-2/MR-5	200	MR-1/MR-2/MR-5	200
	Géotextile	1	Géotextile	0	Géotextile	1
	Sol Support		Sol Support		Sol Support	
	Dalle de Béton	250	Dalle de Béton	240	Dalle de Béton	235
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
T3	MG-112	600	MG-112	300	MG-112	300
	Géotextile	1	Sol Support	1	Sol Support	1
	Dalle de Béton	260	Dalle de Béton	255	Dalle de Béton	250
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MR-5	450	MR-1/MR-2/MR-5	200	MR-1/MR-2/MR-5	200
	Géotextile	1	Géotextile	1	Géotextile	1
	Sol Support		Sol Support		Sol Support	
	Dalle de Béton	260	Dalle de Béton	255	Dalle de Béton	250
T4	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MG-112	575	MG-112	300	MG-112	300
	Géotextile	1	Sol Support	1	Sol Support	1
	Dalle de Béton	275	Dalle de Béton	270	Dalle de Béton	265
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MR-5	450	MR-1/MR-2/MR-5	200	MR-1/MR-2/MR-5	200
	Géotextile	1	Géotextile	1	Géotextile	1
	Sol Support		Sol Support		Sol Support	
T5	Dalle de Béton	275	Dalle de Béton	270	Dalle de Béton	265
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MR-5	550	MR-1/MR-2/MR-5	300	MR-1/MR-2/MR-5	300
	Géotextile	1	Géotextile	1	Géotextile	1
	Sol Support		Sol Support		Sol Support	
	Dalle de Béton	305	Dalle de Béton	295	Dalle de Béton	290
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MR-5	425	MR-1/MR-2/MR-5	200	MR-1/MR-2/MR-5	200
T5	Géotextile	1	Géotextile	1	Géotextile	1
	Sol Support		Sol Support		Sol Support	
	Dalle de Béton	305	Dalle de Béton	295	Dalle de Béton	290
	MG-20	250	MG-20	250	MG-20	250
	MG-112	525	MG-112	300	MG-112	300
	Géotextile	1	Sol Support	1	Sol Support	1
	Sol Support		Sol Support		Sol Support	

6.7 Dalles courtes goujonnées

Les dalles courtes goujonnées sont les plus utilisées au Québec. Ce sont des dalles en béton non armées avec des joints transversaux. Les goujons sont des barres d'acier lisses disposées aux joints pour assurer le transfert de charge d'une dalle à l'autre lors du passage des véhicules.

L'espacement entre les joints transversaux varie de 4 à 5 mètres, ce qui permet aux fissures dues au retrait du béton de se produire dans ces joints, en évitant ainsi les fissures intermédiaires dans la dalle (AQTR, 2009).

6.7.1 Les joints

Il faut prêter une attention particulière aux joints lors de la conception et lors de la construction pour assurer la bonne performance de la dalle en béton.

Joint longitudinaux

Ils contrôlent la fissuration longitudinale et coïncident généralement avec la largeur des voies de la chaussée, soit de 3,0 à 3,5 m. La profondeur du joint doit être du 1/4 au 1/3 de l'épaisseur de la dalle.

Les tirants, qui sont des barres d'acier profilées, sont répartis le long des joints longitudinaux. Ils sont destinés à reprendre les efforts de traction entre les joints des dalles adjacentes. L'utilisation de tirants aux joints longitudinaux n'est pas nécessaire dans le cas où la dalle de béton est prévue avec bordures intégrées car la dalle est confinée par le remblai à l'arrière de la bordure.

Joint transversaux

Ils contrôlent la fissuration transversale en permettant de relâcher:

- les contraintes de tension du béton au retrait;
- les contraintes de retroussement et de gauchissement causées par le comportement différentiel de la température et la teneur en eau à l'intérieur de la dalle de béton.

Le trait de scie pour les joints transversaux se fait sur le béton durci et leurs profondeurs minimum doit être de 1/4 de l'épaisseur de la dalle.

Joint de désolidarisation

Ils sont utilisés pour séparer la dalle de béton des éléments de structures fixes comme les regards, les puisards, les vannes ou encore les bases de lampadaires. Les joints de désolidarisation sont réalisés pour permettre les mouvements horizontaux ou verticaux et diminuer ainsi les contraintes entre les deux éléments à désolidariser.

6.7.2 Construction des chaussées en béton

Pour que l'opération de construction d'une chaussée en béton soit un succès, il est important de respecter les principales étapes, même si plusieurs de ces étapes sont similaires à celles d'un revêtement en enrobé bitumineux. Elles sont rappelées ci-dessous.

Plan de pavage

La préparation du plan de pavage d'une chaussée de béton sur une rue municipale est une étape très importante. En effet, à cette étape, il faut tenir compte des surfaces à bétonner, des contraintes du site, de l'accès aux riverains, de la circulation, de la présence des infrastructures d'utilités publiques, etc.

Le plan de pavage doit présenter la séquence de construction de l'ensemble des secteurs à recouvrir, les largeurs et les longueurs de chaque bande de bétonnage et l'alimentation du béton à la paveuse.

Le plan de pavage permet à l'entrepreneur de:

- prévoir l'équipement à utiliser;
- planifier les travaux de jour ou de nuit pour réduire les nuisances et les contraintes;
- connaître les différentes configurations pour son chantier;
- connaître le plan de transport pour l'approvisionnement en béton;
- connaître le temps approximatif pour chacune des séquences de bétonnage.

Préparation de la plate-forme

La préparation de la plate-forme consiste à niveler la fondation granulaire (MG-20). Elle se fait de façon conventionnelle. Les regards et les puisards doivent être légèrement plus bas que le niveau définitif pour permettre le passage de l'équipement de pavage. La fondation ainsi nivélée et compactée doit avoir un uni de surface acceptable, capable de résister de longues années.

Installation des goujons et des tirants

Pour la mise en place des goujons et des tirants, il faut d'abord procéder à l'installation de leurs supports, appelés aussi «paniers à goujons». Les paniers à goujons sont ancrés solidement dans la fondation pour éviter tout déplacement durant l'opération de bétonnage. Un mauvais alignement des goujons peut entraîner des fissures transversales décalées à environ 300 mm du joint.

Il existe trois méthodes pour l'installation des tirants aux joints longitudinaux :

- La première consiste à fixer le tirant sur deux supports à la position prévue, lorsque le bétonnage de deux voies se fait simultanément.

- La deuxième consiste à insérer le tirant dans le béton frais sur le côté de la dalle. Cette opération est mécanique. Elle est utilisée lorsque le bétonnage de la dalle de la voie adjacente est réalisé dans une seconde étape ou lorsque une seule voie à bétonner est prévue.
- La troisième consiste à placer les tirants par forage, puis les ancrages avec du ciment à base de résine. Cette méthode est utilisée pour l'installation des tirants aux endroits difficiles.

Préparation autour des structures d'utilités publiques

Les regards, les puisards et autres services sont, dans un premier temps, ajustés à leur niveau définitif, puis une planche en élastomère est installée autour de chaque structure pour la désolidariser de la dalle de béton. Vient enfin l'installation des barres d'armature à environ 150 mm tout autour pour éviter l'apparition de fissures de retrait. Cette étape, quand elle est bien préparée, prévient les problèmes de surface, comme les fissures et les épaufures.

Fourniture et transport du béton pour chaussée

Le béton de ciment confectionné pour la construction des chaussées a des caractéristiques propres dont il faut tenir compte lors de l'approvisionnement, du transport et de la mise en œuvre. Ces caractéristiques sont:

- l'affaissement très faible pour permettre la mise en œuvre avec la paveuse à coffrage coulissant;
- l'utilisation de granulats de grandes dimensions (jusqu'à 40 mm) pour favoriser la résistance à la flexion;
- la cadence de bétonnage d'une paveuse par rapport à un bétonnage manuel.

Lors de la planification, il faut tenir compte de la source d'approvisionnement du béton. À cet effet, il faut s'assurer que l'usine (fixe ou mobile) soit, de préférence, entièrement dédiée à la préparation du béton pour chaussée. Il faut qu'elle ait une bonne capacité de malaxage

pour approvisionner régulièrement et suffisamment la paveuse et permettre d'avoir la plus grande constance possible dans le mélange.

Le transport se fait avec des camions à bennes. Les bétonnières ne sont pas utilisées à cause de la vitesse de déchargement qui est très lente ce qui ralentit la cadence et nuit à l'uni de surface.

Mise en place

La mise en place se fait à l'aide d'un train composé d'un équipement d'épandage, d'une paveuse et d'un équipement pour la texture et la cure. Tous les équipements sont contrôlés en élévation et en direction à l'aide d'un système de cordes de guidage et de senseurs placés sur les équipements.

L'équipement d'épandage reçoit le béton frais des camions-bennes et l'épand sur la surface à bétonner. Les camions circulent latéralement à la dalle, en déversant le béton frais dans l'équipement d'épandage. Le béton est épandu en avant de la paveuse à l'aide d'un convoyeur.

La paveuse est l'équipement qui met en place le béton. Elle est équipée de plusieurs mécanismes qui sont, dans l'ordre, un chariot de nivellation, les barres de damage, les vibreurs de consolidation, le moule principal avec les coffrages glissants, le mécanisme latéral de plantage, de tirant et la truelle mécanique. Le béton est extrudé à l'extérieur de la paveuse grâce à la pression qu'exerce cette dernière dans le moule.

L'équipement qui complète le train de pavage sert à texturer la surface (rainurage longitudinal ou transversal) et à appliquer un produit de cure pour le béton. Il sert aussi à corriger les petites imperfections sur la surface, grâce à son pont de finition.

Le sciage des joints

Le sciage de fissuration sert à amorcer une fissure de retrait à chaque joint. Il doit être fait de 8 à 12 heures après le bétonnage. C'est le temps requis pour que le béton de la chaussée puisse supporter les équipements de sciage et pour que la rotation de la scie n'entraîne pas d'arrachement de granulat sur le rebord du trait de scie. Si les traits de scie ne sont pas faits dans les délais, des fissures de retrait apparaîtront aléatoirement sur la dalle fraîchement bétonnée.

Colmatage des joints

Le colmatage des joints transversaux et longitudinaux constitue la dernière étape de la construction d'une chaussée en béton. Le colmatage des joints sert à éviter la pénétration de l'eau dans la fondation pour empêcher la dégradation et l'apparition des épaufures sur la dalle. Les produits utilisés sont des matériaux bitumineux, pour les joints longitudinaux, ou une garniture en néoprène pour les joints transversaux.

6.8 Conclusion

L'option du béton pour les chaussées municipales est souvent négligé. Le béton qui est souvent utilisé aux États-Unis, offre plus d'avantages pour les routes en climat canadien, et particulièrement québécois, car il élimine, entre autres, la nécessité de restreindre le poids des camions en période de dégel printanier. De plus, il est plus économique que l'enrobé bitumineux à long terme.

Ce chapitre a présenté le catalogue de dimensionnement structural des chaussées rigides, car nous avons vu un intérêt et un avantage pour la Ville de Longueuil à considérer la chaussée rigide pour les rues les plus sollicitées par le trafic lourd.

Cette solution de rechange peut contribuer, à long terme, à réduire les coûts de construction initiaux, tout en assurant une performance, une longévité et un faible coût d'entretien.

Le catalogue de dimensionnement structural des chaussées rigides donne, selon la classe de trafic, deux options de structure pour chaque sol support.

Les structures proposées sont données par ordre décroissant du coût de réalisation. Il est proposé, chaque fois que cela est possible, une structure avec matériaux neufs et avec matériaux recyclés, pour permettre le choix selon la disponibilité des matériaux.

CHAPITRE 7

IMPACTS ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

7.1 Introduction

Pour chaque projet routier, il faut examiner de quelle façon il contribue au développement économique et à la sécurité des lieux et des personnes, mais aussi à l'amélioration de l'accessibilité et de la mobilité, et enfin de quelle façon il s'insère dans une démarche environnementale durable. Les impacts ne se limitent pas aux seuls effets liés à l'efficacité économique du projet en lui-même, mais un bon nombre de ces impacts peuvent s'avérer à l'échelle locale, régionale et peut-être même nationale (AIPCR, 2008).

En effet, il est reconnu que le financement de projets routiers contribue de façon significative à l'activité économique d'une région ainsi qu'à l'utilisation et à la valorisation des sols. Parallèlement à cela, les projets de construction de route génèrent inévitablement un certain nombre d'effets préjudiciables sur l'environnement pendant la phase de construction et durant l'exploitation de la route. Néanmoins, les administrations routières observent des lignes de conduite afin d'insérer les projets dans un cadre de développement durable, entre autres par le recyclage de matériaux routiers, en préservant de précieuses ressources pour les générations futures.

C'est dans cette perspective d'apports économique et environnemental que sont présentés les impacts du projet de catalogue de dimensionnement structural des chaussées. Le dimensionnement des chaussées selon le catalogue donnera un réseau routier en très bon état. Bien entendu, l'exploitation d'un réseau routier en santé a des impacts économiques, sociaux et environnementaux, sur la collectivité; soit l'administration (la Ville), les usagers de la route et la société en général. Ces impacts sont, pour la plupart, difficiles à quantifier en termes monétaires. C'est pour cela que, dans le cadre de notre projet, ils sont exprimés le plus souvent sous forme d'évaluations qualitatives.

7.2 Impact économique sur la collectivité

L'impact économique se concentre le plus souvent au niveau des investissements relatifs à l'entretien, à la réfection et à la construction des chaussées, comme présenté précédemment. Ceci étant des retombés ou impacts directs sur les administrations, il est rare qu'on tienne compte des retombées de ces investissements sur le reste de la collectivité.

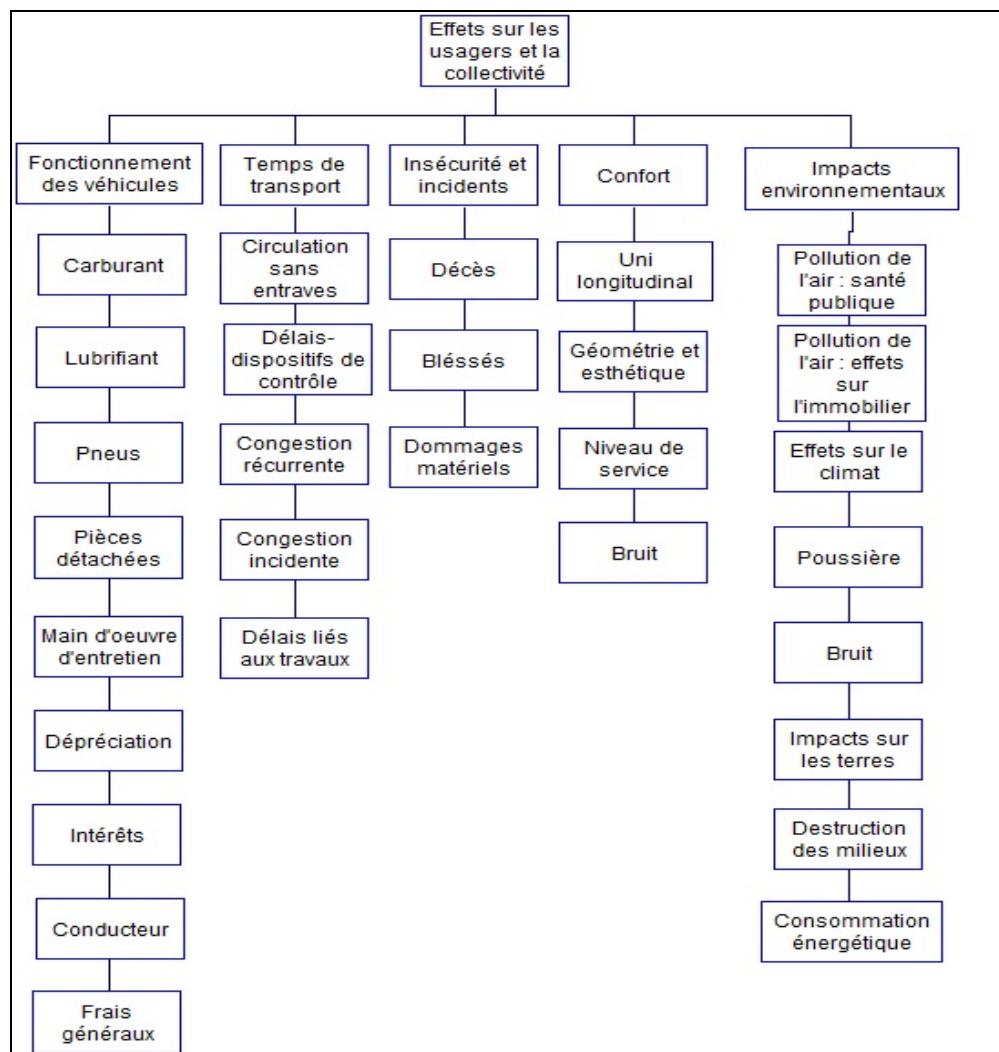


Figure 7.1 Allocation des coûts aux usagers et à la collectivité.

Tirée de Roy (2009, p. 11)

Il existe des modèles (HERST-ST et HDM4), mis au point dans des centres de recherche universitaires et par des administrations routières en Amérique du Nord et ailleurs dans le monde, qui permettent de prendre en considération, dans l'exploitation du réseau routier, les coûts à la collectivité et, plus particulièrement, les coûts aux usagers. Tout récemment un modèle d'évaluation des coûts d'exploitation des véhicules en fonction de l'état de la chaussée a été élaboré pour le compte de la direction du laboratoire des chaussées du MTQ afin d'améliorer son système de gestion et tenir compte des coûts aux usagers et à la collectivité, comme le montre la figure 6.1 (Roy, 2009).

À cet effet, les prochains articles présentent, l'impact économique du catalogue sur l'administration (la Ville), les usagers de la route et la société en général.

7.2.1 Impact sur l'administration

En projet de développement, Longueuil construit 1500 unités de logements par année, ce qui implique de nouvelles rues à construire, soit 11 km en moyenne. Ce qui représente 35 millions de dollars par année, dont 40 % est dédié à la chaussée.

En réfection d'infrastructures municipales, Longueuil dépense annuellement 45 à 50 millions de dollars dont 50 % vont à la réfection de la chaussée.

Au cours des prochaines années, des centaines de millions de dollars seront investis dans la remise en état et la reconstruction des chaussées qui auront atteint leur durée de vie. Ces investissements sont essentiels pour maintenir la qualité et la pérennité du réseau routier ainsi qu'un niveau élevé de sécurité.

Gain en temps et en coût d'investissement

Ainsi, l'utilisation du catalogue permet de déterminer et de connaître, la structure des chaussées appropriées, de gagner du temps, de mieux répartir les coûts de construction et d'obtenir une meilleure estimation en avant-projet des coûts d'investissement pour les projets de réhabilitation ou de développement. La connaissance du sol support dans la zone ciblée par le projet permet de choisir la structure de chaussée en fonction du trafic projeté.

En effet, la connaissance des coûts des projets permet la prise de décision et l'intervention rapide pour la réfection, la reconstruction ou même la construction nouvelle. Pour les décideurs, le catalogue est un outil de prise de décision. Pour les ingénieurs, il est un outil facile à utiliser qui leur permet de gagner du temps. D'après la Direction du génie, on estime qu'il est possible de réaliser des économies de 1% sur l'investissement annuel dès la première année d'exploitation du catalogue.

Le catalogue propose aussi, pour des considérations économiques, l'utilisation de matériaux recyclés, chaque fois que le dimensionnement structural le permet.

Les structures types proposées par le catalogue sont le résultat d'un dimensionnement répondant aux contraintes de gel rencontré au Québec, ce qui implique que la chaussée ainsi construite sera durable et sécuritaire à coût raisonnable. Ainsi, seul un entretien préventif sera nécessaire pendant sa vie utile.

Le catalogue ainsi réalisé permet donc un dimensionnement efficace et optimal, ce qui permettra de réduire les coûts découlant d'une mauvaise conception (absence de protection contre le gel, mauvaise connaissance des sols et de leurs comportements...) donc de réduire les coûts d'entretien et de réparation des fissures et des nids-de-poule et d'autres dégradations précoces qui peuvent apparaître sur des chaussées mal dimensionnées ou mal construites.

Pour le service des travaux publics, le coût annuel d'intervention sur les chaussées est de l'ordre de 2,5 millions de dollars. Ceci ne correspond pas aux besoins réels, mais représente uniquement l'enveloppe allouée chaque année pour les petites interventions (resurfaçage, réparation de nids-de-poules...) sur près de 905 kilomètres de rue. D'après le service des Travaux publics, cette enveloppe correspond au dixième des besoins en entretien routier.

Il est certain que, pour les Directions du génie et des travaux publics, le catalogue de dimensionnement structural des chaussées est un outil très important et essentiel pour le maintien des investissements et de la qualité, de même que la pérennité du réseau routier de Longueuil.

7.2.2 Impact sur les usagers de la route

Économie de coût de fonctionnement

Force est d'admettre qu'il n'est pas possible de quantifier monétairement les bénéfices de ce catalogue pour les usagers de la route. Néanmoins, il est certain que la construction de chaussées dimensionnées selon le catalogue offrira aux usagers:

- des routes présentant une performance structurale qui se traduira par une diminution de la dégradation de la chaussée associée à la fatigue ou au gel (fissures, nids-de-poule, soulèvement dû au gel...) et un meilleur confort au roulement (uni de surface), tout le long de leurs durées de vie;
- une réduction des coûts d'entretien des véhicules en matière de réparation, de pièces détachées, d'usure des pneus, de consommation de carburant etc;
- un gain en temps de transport, puisqu'une chaussée en bon état rendra la circulation fluide et présentera moins d'entraves et de congestion.

7.2.3 Impact sur la société en général

En ce qui à trait aux coûts sociaux, ils se traduisent par des conséquences associées à l'économie locale ou à la sécurité:

- Nous avons constaté qu'une réfection des rues commerciales, apporte un plus grand achalandage et un rebond économique apprécié des commerçants.
- L'amélioration de la qualité et de la performance du réseau routier a aussi pour fonction d'améliorer la sécurité des citoyens. Il y a donc moins d'accidents de la route et moins de congestion.

7.3 Impact environnemental

L'implantation et la construction de routes sont des opérations entreprises dans le but de renforcer et d'améliorer le réseau routier. Malheureusement, de tels projets sont susceptibles de détruire l'environnement. En effet, il est inévitable qu'un projet routier soit sans impact négatif sur le milieu naturel que ce soit pendant la phase de chantier ou durant son exploitation.

Bien que les impacts identifiés pendant la phase de réalisation de la route soient temporaires et disparaissent avec la levée du chantier, les impacts de l'utilisation de la route (pollution, bruit, déboisement, exploitation des carrières,..) sont quant à eux permanents. Le rôle de l'ingénieur est de faire en sorte que ces impacts négatifs soient compensés grâce au suivi d'un certain nombre de mesures d'atténuations.

À cet effet, le catalogue propose:

- des structures types avec la possibilité d'utiliser les matériaux recyclés, qui sont le résultat de mélange de béton bitumineux et de granulats conventionnels. Les matériaux de classe MR-1, MR-2 ou MR-5 sont proposés dans les couches de sous-fondation. Ainsi ces propositions permettent de conserver des ressources précieuses et de réduire les impacts sur l'environnement;

- des chaussées souples en zone urbaine, mieux adaptées pour réduire la nuisance par le bruit (pneumatique chaussée);
- des chaussées rigides en zone industrielle, mieux adaptées aux agressions du trafic lourd, elles offrent une longue performance et demandent un entretien minimal; elles offrent donc une économie d'énergie et de matériaux, de même qu'une diminution de la pollution liée à son exploitation. Leurs couleurs pâles permettent de réduire l'énergie nécessaire pour l'éclairage et réduisent l'effet d'îlot de chaleur en milieu urbain.

La chaussée une fois bien dimensionnée et bien construite, offre une valorisation au quartier, ce qui a un impact sur le bien-être des citoyens et sur l'environnement ambiant : moins de bruit, de pollution et, bien sûr, moins de stress.

7.4 Conclusion

Le catalogue de dimensionnement structural des chaussées implique des routes bien conçues et bien construites donc un réseau routier en bon état. L'impact économique direct se reflète dans l'économie d'entretien, de réfection et de reconstruction des chaussées. Pour les Directions du génie et des travaux publics, le catalogue est un outil essentiel pour le maintien des investissements, de la qualité et la pérennité du réseau routier. Au-delà de cet impact pour l'administration, il est évident que les investissements pour la construction de routes durables, comme présenté dans ce chapitre, ont des retombés sur l'usager de la route et sur la collectivité.

Le catalogue favorise l'utilisation de matériaux recyclés et permet ainsi la préservation des ressources naturelles, ce qui réduit ainsi l'impact sur l'environnement. Il offre un choix de chaussées souples, mieux adaptées au milieu résidentiel (moins de bruit), ou rigides, mieux adaptées au milieu industriel (longue durée de vie, moins d'entretien).

Un réseau routier en santé a un impact sur la valorisation des quartiers, le bien-être des citoyens, sur l'environnement ambiant (moins de bruit, de pollution, de stress...) et sur la société en général.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le présent projet de mémoire vise à répondre aux besoins de la Ville de Longueuil en matière de dimensionnement structural des chaussées. Une approche et une méthodologie sont développées pour l'élaboration d'un catalogue de dimensionnement structural des chaussées adaptées aux conditions particulières de la Ville.

Dans un premier temps sont présentées les notions de base sur les chaussées et leur dimensionnement ainsi que les particularités de la chaussée municipale (contraintes et dégradations). Par la suite, une analyse des données et outils consultés a été faite dans le but de caractériser les particularités de la Ville et de ses besoins. Cette analyse a permis de déterminer les paramètres et les données dans les calculs pour l'élaboration du catalogue.

La caractérisation géotechnique des sols a permis de dresser une carte interactive et évolutive. En effet, cette carte sera mise à jour continuellement grâce aux études géotechniques d'avant-projet qui sont commandées chaque année par la Direction du génie de la Ville. Elle est interactive, car les données de caractérisation des sols seront exploitées par la Direction de la géomatique. Ces données seront intégrées à la géobase (base de données) et seront accessibles aux utilisateurs (génie, bâtiment, urbanisme, travaux publics, etc.). Ainsi, en sélectionnant un tronçon de rue à partir de la géobase, on pourra obtenir la nature du sol support (à chaque fois qu'il est disponible).

Le catalogue traduit la politique de gestion routière de la Ville à savoir l'optimisation des coûts tout en visant un dimensionnement structural adéquat et une utilisation rationnelle des matériaux qui s'inscrit dans une perspective de développement durable.

La démarche pour la réalisation du catalogue est donnée par l'arbre décisionnel qui établit le choix du type de structure (souple ou rigide) tout en répondant étroitement aux besoins de la Direction du génie. Ainsi, le catalogue propose des structures souples pour le réseau routier en général selon la classe fonctionnelle, et des structures rigides pour les cas particuliers de

chaussées fortement sollicitées. Il propose des structures économiques en favorisant l'utilisation de matériaux granulaires recyclés et permet aussi le choix selon leur disponibilité. Il assure ainsi la préservation des ressources naturelles et réduit l'impact sur l'environnement.

Le catalogue est aussi le résultat d'un dimensionnement répondant aux contraintes du climat nordique. À cet effet, les épaisseurs de couche constituant la structure de chaussée sont dimensionnées pour résister au gel afin d'éviter l'endommagement du revêtement (béton bitumineux ou dalle en béton de ciment).

Les structures proposées sont données par ordre croissant du coût de réalisation. Il faut également préciser que nous avons pris par défaut les coûts fournis par le logiciel «Chaussée 2», sans faire de mise à jour car nous avons constatés qu'ils étaient sensiblement comparables au prix que nous avons à Longueuil et que l'évolution des coûts est la même pour tout les matériaux constituants la structure de la chaussée.

Les résultats de quelques vérifications avec le logiciel *Winjulea* permettent de conclure que les méthodes analytiques pour le dimensionnement structural des chaussées donnent sensiblement les mêmes résultats que les méthodes empiriques.

Les impacts économiques et environnementaux sont présentés au chapitre 7 et se résument ainsi:

- Impacts pour l'administration en matière d'investissements rentables pour la construction de routes durables.
- Retombées positives sur l'usager de la route et sur la collectivité en termes de coûts aux usagers réduits et de temps de déplacement.

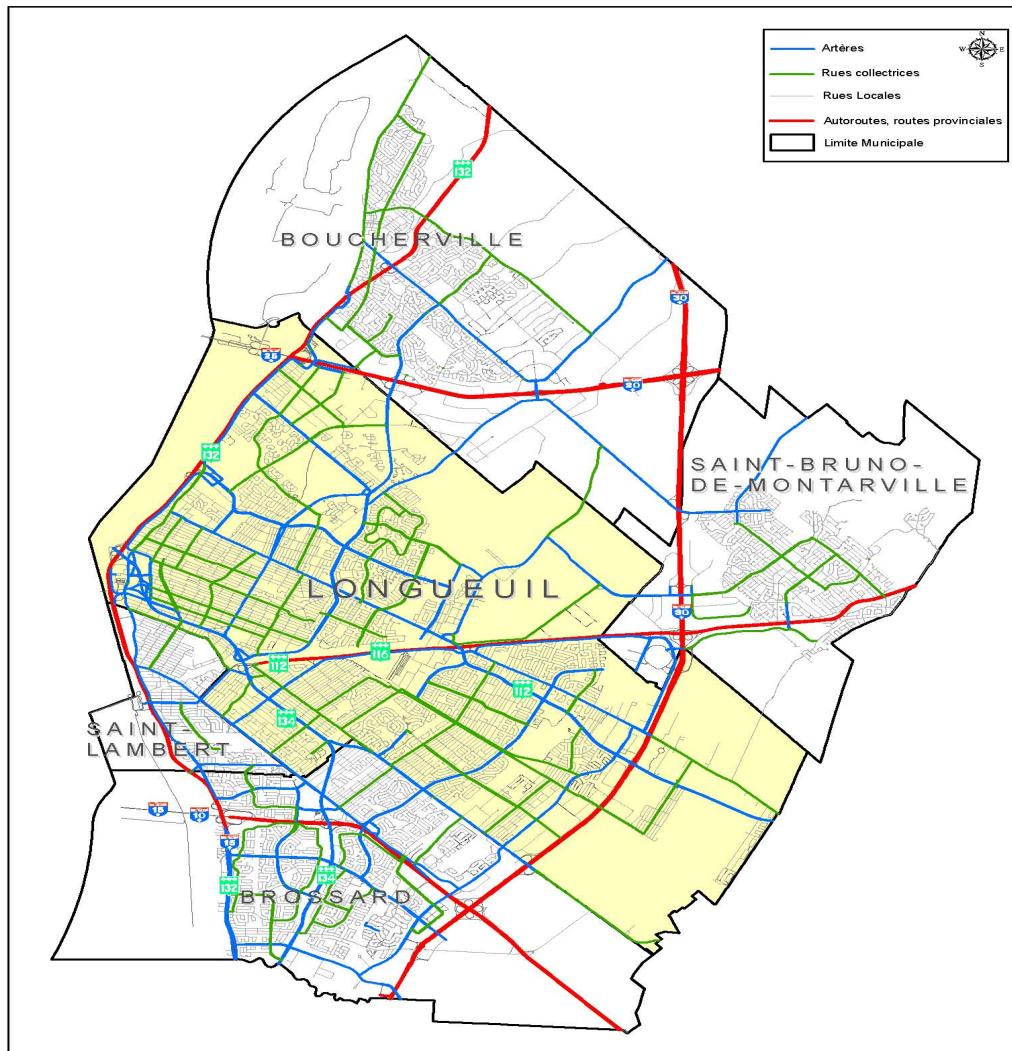
Pour préserver les chaussées et maximiser leur durée de vie, un dimensionnement structural approprié est requis. Cependant, les mesures suivantes doivent être mises en œuvre afin d'assurer la durabilité:

- Les sols de Longueuil sont principalement composés d'argile, d'argile silteuse et de silt, qui sont des matériaux qualifiés de gélifs à très gélifs. Il faut donc prêter une attention particulière à la protection contre le gel au cours des cycles de gel-dégel et assurer ainsi une bonne performance de la structure de chaussée. De plus, en raison de leur faible perméabilité, les structures de chaussée doivent être bien drainées (drain de rive,...) afin d'améliorer leur comportement structural.
- Baliser les livrables des études géotechniques commandées par la Direction du génie. Il serait utile de préciser pour les sols à grains fins la teneur en eau et les limites d'Atterberg, soit les limites de liquidité et de plasticité. Ce sont des données très importantes, entre autres pour délimiter les propriétés, le degré de compacité et le comportement de mélange de sols (argile, silt, sable,..).
- Mettre à jour le cahier des clauses techniques générales pour la construction des chaussées, en ajoutant des directives et des exigences pour les chaussées en béton de ciment.
- Évaluer la possibilité, pour la Ville de Longueuil, de se doter d'un site d'entreposage et de traitement des matériaux récupérés des travaux de reconstruction des chaussées, soit le pavage et les fondations granulaires, compte tenu des projets de réfection en perspective. Cette mesure aura un apport environnemental et économique pour la Ville. Ces matériaux pourront être réutilisés pour les projets de construction ou être vendus.

Nous recommandons aux municipalités d'utiliser la méthode MTQ pour le dimensionnement structural des chaussées souples ou simplement pour prévoir la couverture contre le gel des structures des chaussées rigides.

ANNEXE I

LOCALISATION DES RUES PAR CLASSE FONCTIONNELLE DANS L'AGGLOMÉRATION DE LONGUEUIL



Source: Cette figure a été réalisée en collaboration avec le service de la planification des infrastructures, à partir de la base de données de la Ville de Longueuil.

ANNEXE II

RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DE L'ÉTAT DES CHAUSSÉES DU RÉSEAU ROUTIER DE LONGUEUIL

Condition visuelle de la surface (PCI) (données décembre 2003)															
	Très faible (0 à 20)			Faible (20 à 40)			Passable (40 à 60)			Bon (60 à 80)			Très bon (80 à 100)		
	Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur	
		km	%		km	%		km	%		km	%		km	%
Toute la ville	217	45	2,7%	554	95	5,6%	1512	236	14,0%	3073	465	27,5%	5842	847	50,2%
Artère principale	13	2	2,4%	34	5	4,9%	82	12	11,7%	177	28	27,9%	375	54	53,2%
Artère secondaire	30	6	3,1%	73	15	7,7%	179	31	15,5%	348	53	27,2%	643	91	46,5%
Collectrice	43	9	3,9%	114	17	7,8%	299	43	19,4%	460	60	27,4%	647	91	41,5%
Locale	131	28	2,4%	333	58	5,0%	952	151	12,9%	2088	323	27,6%	4177	611	52,2%
Uni (confort au roulement) (données décembre 2003)															
	Très faible (10 à 15)			Faible (8 à 10)			Passable (4 à 8)			Bon (2 à 4)			Très bon (0 à 2)		
	Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur	
		km	%		km	%		km	%		km	%		km	%
Toute la ville	37	3	0,7%	208	21	4,6%	1740	250	56,1%	942	163	36,5%	57	9	2,1%
Artère principale	5	0	0,3%	50	5	5,2%	328	47	51,3%	205	36	39,8%	21	3	3,4%
Artère secondaire	12	1	0,6%	47	5	3,1%	548	84	53,4%	355	63	40,1%	24	5	2,9%
Collectrice	18	2	0,9%	108	11	5,9%	824	113	60,2%	363	60	32,1%	12	2	1,0%
Locale	2	0	4,2%	3	0	1,8%	40	6	63,8%	19	3	30,1%	0	0	0,0%
Portance (durée de vie, années) (données mars 2004)															
	Très faible (0 à 2)			Faible (2 à 5)			Passable (5 à 10)			Bon (10 à 20)			Très bon (20 à 50)		
	Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur	
		km	%		km	%		km	%		km	%		km	%
Toute la ville	213	36,2	9,0%	560	90,6	23,0%	431	74,4	19,0%	410	72	18,0%	695	118,3	30,0%
Artère principale	87	15	19,0%	101	18,1	22,0%	84	14,9	19,0%	70	12	15,0%	115	20,5	25,0%
Artère secondaire	117	20	15,0%	162	31,1	23,0%	142	27,3	21,0%	123	20,6	16,0%	207	33,9	26,0%
Collectrice	8	1,1	1,0%	297	41,4	26,0%	205	32,2	20,0%	186	34	21,0%	286	50,4	32,0%
Locale	1	0,1	1,0%	0	0	0,0%	0	0	0,0%	31	5,4	28,0%	87	13,5	71,0%

Source: Ce tableau est adapté du rapport final «Programme d'inventaire et d'entretien des infrastructures municipales», volume 2, sections 7 à 13, présenté à la Ville de Longueuil par le consortium Dessau-Soprin/ Groupe S.M, juillet 2004.

ANNEXE III

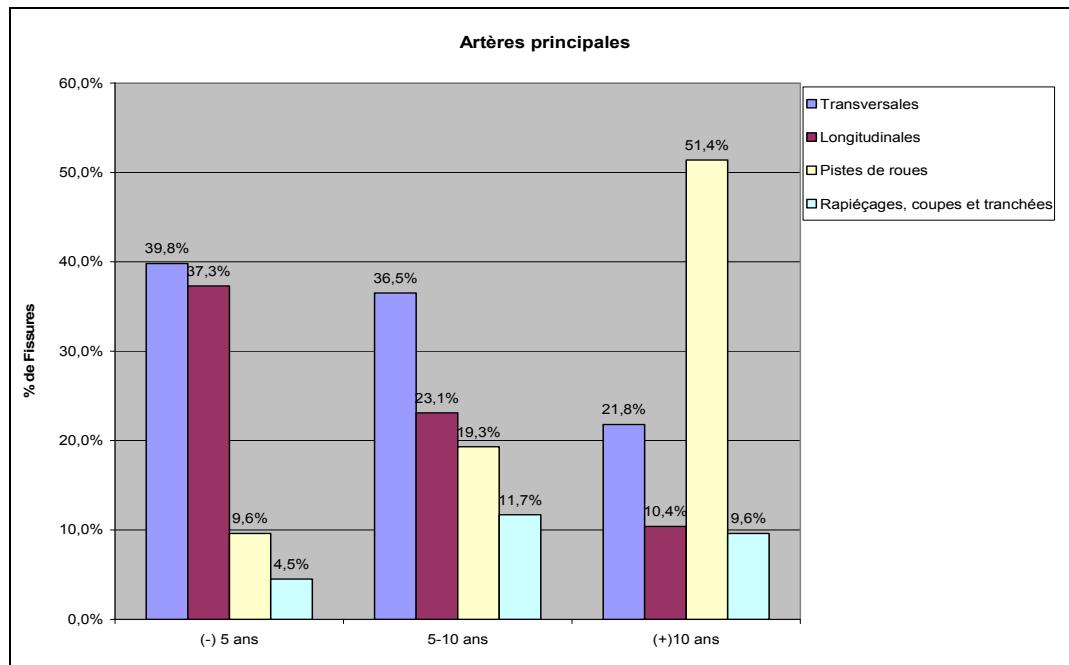
ÉTAT GLOBAL (OCI) (DONNÉES DÉCEMBRE 2003)

	Très faible (0 à 20)			Faible (20 à 40)			Passable (40 à 60)			Bon (60 à 80)			Très bon (80 à 100)		
	Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur		Nbre de UG	Longueur	
		km	%		km	%		km	%		km	%		km	%
Toute la ville	148	31	1,8%	601	103	6,1%	1882	283	16,7%	3611	551	36,2%	4956	721	42,7%
Artère principale	4	0	0,3%	42	7	6,5%	148	20	19,5%	349	55	54,3%	138	20	19,3%
Artère secondaire	5	1	0,3%	84	16	8,1%	283	47	23,8%	546	84	42,6%	355	49	25,2%
Collectrice	11	2	1,1%	142	22	9,9%	492	65	29,6%	616	88	39,9%	302	43	19,6%
Locale	128	28	2,3%	333	58	5,0%	959	151	12,9%	2100	325	27,7%	4161	609	52,0%

Source: Ce tableau est adapté du rapport final « Programme d'inventaire et d'entretien des infrastructures municipales», volume 2, sections 7 à 13, présenté à la Ville de Longueuil par le consortium Dessau-Soprin/ Groupe S.M, juillet 2004.

ANNEXE IV

ÉTAT VISUEL DE SURFACE (SÉLECTION DES DÉGRADATIONS SUR ARTÈRES PRINCIPALES)



Source: Cette figure est tirée du colloque Journée du bitume - Étude de 1700 km de chaussées souples du réseau routier de la Ville de Longueuil, présenté par Luc Chartrand, ing. LVM Fondatec, 2005.

ANNEXE V

CARACTÉRISATION DES SOLS, ARRONDISSEMENT DE VIEUX LONGUEUIL

Contrats	Rues	Nbre de forage et puits	Nature du sol	Observation
2007-GEN-352 (2008)	Chemin de Chambley (entre les rues Lamarre et Cherbourg)	16	Remblai; silt, un peu de sable et de gravier composition variable (classe ML, CL ou CH) Argile silteuse, Tilt - sable silteux, un peu de gravier et trace et argile Classe CL ou CH gravier et trace et argile Classe SM Roc à 1,52 à 2,67m de profondeur rencontré sur 6F eau souterraine < 1,57m à 2,35m	Les matériaux des sols support sont reputés très gélifs. ω_N - 26% ω_L - 45% ω_p - 23% I_p = 22% I = 0,7
2007-GEN-138 2007-GEN-129 2007-GEN-140	Développement "Villas sur le Golf" 28-08-2007	11	Remblai; sable silteux et un peu de gravier (classe SM) reposant sur un dépôt de silt argileux	
2007-GEN-118 2007-GEN-112	Développement "Parcours du Cerf" Louis-Jobin François-Sullivan Charles-Daudelin Sylvia-Daoust	6	Silt (traces de sable et sableux), argile et traces de gravier Socle rocheux: composé de shale gris (altéré) 1 à 1,50 de profondeur	
2007-GEN-362 juin-08	Boul. Roland-Therrien entre la rue (entre la rue Fréchette et le boul. Fernand-Lafontaine	25	Argile silteuse, traces de sable classe variable CL ou SM ou CH Till (silt et sable, trace d'argile, un peu de gravier) classe (SM) Roc fracturé à 0,813 à 1,70 Roc à des profondeurs: .813 à 1,7 (fracturé) 1,70 à 2,40m	Matériaux très gélifs

Annexes V (suite); Caractérisation des sols, arrondissement de Vieux Longueuil

Contrats	Rues	Nbre de forage et puits	Nature du sol	Observation
2010-GEN-327	PRECO Lot 2 - Rue Ste-Hélène (entre Champlain et Maisonneuve) et King-George (entre ch. Chambley et Gamache)	18	Argile silteuse avec un peu de gravier ; traces de gravier et sable Classe CL, CH et GM Remblai: Argile silteuse, un peu de gravier, brun Classe SM Argile silteuse Classe ML	$\omega - 10 @ 22\%$ $\omega - 27\%$ $\omega_L - 48\% \quad \omega_p - 38\%$ $I_p = 10\% \quad I_l = 1,1$
			Roc à 0,86 à 1,35 de profondeur rencontré sur 10F	
2007-GEN-354	Boul. Jacques-Cartier Est Phase 1 (entre Boul. Roland-Therrien et ch. Chambley)	32	Sol naturel constitué principalement de silt Till silteux, silt argileux, silt et sable, silt sableux ou graveleux Classe ML Remblai: mélange hétérogène	Infrastructure du sol est considérée comme gélive. Présence de fines dans les fondations du sol $\omega - 8 @ 17\%$ Profondeur de roc à environ 3,00m et moins
2007-GEN-355	Boul. Jacques-Cartier Ouest Phase 2 (entre ch. Chambley et Ste-Hélène)	42	Till: silt argileux Classe CL ou CH Sol constitué de silt, sable silteux, sable et gravier silteux, sable graveleux et sable et silt Classe ML, SM, OL (TF-90-08) - - - CH (TF-91-08) - - - CH	Sol naturel composé de Till ou plus souvent du silt argileux avec traces de sable. I_L de 0,05 et 0,14 Sol considéré comme gélif. Profondeur variant entre 0,61m @ 1,06m $\omega - 25,4\% \quad \omega_L - 59,2\% \quad \omega_p - 23,7\%$ $I_p = 36,5 \quad I_l = 0,05$
			Roc (possible) de 0,85 @ 1,72 de profondeur sur TF-58 à TF-96	$\omega - 25,6\% \quad \omega_L - 50\% \quad \omega_p - 21,7\%$ $I_p = 28,3 \quad I_l = 0,14$

Annexes V (suite); Caractérisation des sols, arrondissement de Vieux Longueuil

Contrats	Rues	Nbre de forage et puits	Nature du sol	Observation
2009-GEN-200	Chemin Chambley LOT 11 Entre rues Lamarre et Cherbourg De F-27 @ F-43 (sans F-41) et F-101 @ F104 (forages cumulés d'un autre projet)	20	Sol constitué d'un remblai, d'un Till ou d'une argile silteuse de plasticité élevée (CH). Remblai constitué principalement de silt un peu de sable et gravier à un silt sableux un peu de gravier Classe ML-SM Till : passe d'un silt et sable dans la partie la plus fine à un silt traces de sable et un sable silteux un peu de gravier dans la partie la plus grossière. Classe SM Couche d'argile silteuse à plasticité élevée Classe CL-CH (F-40) - - - CH Roc de 1,52 @ 2,67m de profondeur et plus (selon Forages)	Sols supports considérés de moyennement gélifs à très gélifs. Eau souterraine détectée entre 2,30m à 3,45m Teneur en eau non spécifié et par conséquent, le sol varie entre un CH ou un CL $\omega - 30,0\%$ $\omega_L - 58,0\%$ $\omega_p - 29,0\%$ $I_p = 29,0$ $I_f = 0,03$ Roc très friable observé lors des forages
2007-GEN-317	PIRI LOT 3 Rue Vermont (entre ch. Chambley et rue Laurier) F-01-L3 @ F-06-L3 Boul. Curé-Poirier Ouest (entre St-Alexandre et St-Thomas) F-07-L3 Rue Saint-Alexandre (entre Boul. Ste-Foy et Boul. Wilson)	6 1 11	Sol constitué silt argileux et sableux à un silt et argile traces de sable Classe CL, CH Roc probable de 0,80m @1,50m Sol constitué de silt argileux et sableux traces de gravier Classe CL Sol constitué de silt argileux et sableux à un silt et argile un peu de sable à un sable un peu de silt ou silteux traces d'argile. Classe CL, CH, CL-ML, SM et SM-ML	Sol support ayant une compacité moyenne Roc friable: shale noir Sol support considéré comme gélif avec une compacité moyenne. Roc probable entre 0,90m et 1,50m de profondeur. Roc friable.

Annexes V (suite); Caractérisation des sols, arrondissement de Vieux Longueuil

Contrats	Rues	Nbre de forage et puits	Nature du sol	Observation
2007-GEN-317	PIRI LOT 3 (suite) Rue Lavallée (entre Boul. Curé-Poirier Est et rue Saint-Hilaire) F-19-L3 @ F-22-L3	4	Sol constitué de silt et argile traces de sable à silt sableux et argileux à sable silteux un peu de gravier. Classe CH, CL et SM-ML Roc présent de 0,90m @ 1,30m de prof.	Sol support considéré gélif à très gélif. Roc friable: shale noir
	Boul. Nobert (entre Rue Chatham et chemin Chambley) F-23-L3 et F-24-L3	2	Sol constitué de silt et argile un peu de sable avec un remblai de silt sableux un peu de gravier Classe CH et ML Roc présent de 0,68m @ 1,50m de prof.	Sol support de nature gélive. Remblai remanié.
	Rue Chatham (entre Rue Beaubien et Boul. Nobert) F-25-L3 @ F-28-L3	4	Sol support contenant un remblai de silt argileux et sableux traces de gravier à sable silteux traces d'argile à un graveir et sable un peu de silt. Classe CL, SM-ML et GM Roc présent @ 1,50m de prof à F-27	Sol support possède une compacité de lâche à moyenne avec présence de mcx de Roc. Remblai remanié. Roc friable: shale noir à F-27-L3
	Rue Louise (entre ch. Chambley et rue Lavallée) F-29-L3 @ F-33-L3	5	Sol constitué de silt argileux et sableux à sable silteux et/ou graveleux traces de gravier à un silt et argile. Classe CH, ML, SM-ML et CL Roc observé entre 1,32m @ 1,50m de profonfeur.	Sol support considéré moyennement gélif à gélif. Roc Friable: shale noir
2007-GEN-332	Rue Fernand (entre Boul. Cousineau et Pilon) TF-01-07 @ TF-04-07	4	Sol support consisté de silt argileux traces de sable Classe CL	Sol considéré comme gélif à très gélif pour tous les forages.
	Rue Nadeau (entre Grenier et Maricourt) TF-05-07 @ TF-07-07 + TF-65-07 et TF-66-07	5	Sol support contenant du silt argileux Classe CH	TF-02-07 - - - CL ω - 28,5% ω_L - 42,2% ω_p - 23,1% I_p = 19,1 I_l = 0,28
	Rue Park (entre Boul. Davis et Cousineau) TF-08-07 @ TF-15-07	8	Sol support consisté d'une couche de remblai et de sol naturel de silt argileux un peu de sable. Classe CL	TF-07-07 - - - CH ω - 40,6% ω_L - 57,7% ω_p - 25,9% I_p = 31,8 I_l = 0,46
	Rue Princes-Charles (entre les Boul. Davis et Kimber) TF-16-07 @ TF-30-07	15	Couche de remblai et un sol support naturel consisté d'un silt argileux traces de gravier Classe CL ou CH	TF-08-07 - - - CL ω - 30,0% ω_L - 46,2% ω_p - 22,4% I_p = 23,8 I_l = 0,32 TF-24-07 - - - CL ω - 28,9% ω_L - 43,6% ω_p - 21,9% I_p = 21,7 I_l = 0,32

Annexes V (suite); Caractérisation des sols, arrondissement de Vieux Longueuil

Contrats	Rues	Nbre de forage et puits	Nature du sol	Observation
2007-GEN-204	Rue St-Jean (entre Gentilly ouest et Ste-Catherine) F-01-07 et F-02-07	2	Sol support constitué de sable et gravier un peu de silt à silt argileux et	Forages réalisés à une profondeur max de 1,50m.
	Rue Boulé (entre Tyne et Forant) F-03-07	1	sableux à sable silteux un peu d'argile à un silt sableux et graveleux à une argile silteuse traces de sable	Aucun essai sur la teneur en eau et/ou limite d'Atterberg réalisé.
	Rue Forant (entre Boulé et Briggs est) F-04-07	1		
	Rue Tyne (entre Ch. Du Lac et Boulé) F-05-07 et F-06-07	2	Classe CL, CH, ML, ML-CL, SM-ML, GP/SP, SM	Les forages observés « CL et CH » peuvent différer.
	Rue Cartier (entre Joséphine et Beaudoin) F-07-07 @ F-09-07	3		
	Rue D'Iberville (entre LeMoyne ouest et Perrault) F-10-07 et F-11-07	2		
	Rue LeMoyne ouest (entre D'Iberville et Montarville) F-12-07 @ F-14-07	3		
	Rue Lavallée (entre Lamarre et Barthélémy) F-15-07 et F-16-07	2		
	Boulevard Quinn (entre Curé-Poirier ouest et NewHaven) F-17-07 @ F-25-07	9		
	Rue Duvernay (entre Curé-Poirier ouest et Front) F-26-07 @ F-30-07	5	<u>Roc</u> observé de 0,85m @ 1,45m de profondeur.	

ANNEXE VI

CARACTÉRISATION DES SOLS, ARRONDISSEMENT DE GREENFIELD PARK

Contrats	Rues	Nbre de forage et puits	Nature du sol	Observation
2009	Churchill (de Parent à Springfield)	4	silt argileux (3F) trace de gravier et sable ⇒ classe "CH" Roc à 1,20 à 2,30 (2F); et 3,45 à 4,45 (2F) Composé de shale Gris très altéré et très fracturé Profondeur de la nappe d'eau souterraine (avril) et 2,80 à 3,45 de profondeur Module résilient de 36 Mpa	WI = 56% W _p = 23% I _{pl} = 33% ω = 25% I _c = 0,05 Les sols d'infrastructures sont considérés comme des sols à faible plasticité (I _p < 12) avec un indice de liquidité < 0,9
2008	Bassin de rétention rue Louis - Lamarre - Nélon	6	silt argileux et argile silteuse	
2008	St-Charles (entre la rue Verchères et le boul. Taschereau)	4	Silt argileux, traces à un peu de gravier Roc : le socle rocheux, c'est du shale gris-noir désagrégré, très fracturé atteint à des profondeurs entre 1,37 et 1,98m (4F)	
2007-GEN-331 (Cumule des projets dans les arr. de GPK et HUB)	LOT 5 - Rue Murray (B1) F-13 @ F-19 (entre rue James E. Davis et Régent) Rue Ivy F-01 @ F-04	7	Sol constitué de silt et sable à un silt un peu de sable et gravier à un gravier silteux. Classe CL, ML et GM Remblai (F-01 et F-04); sable silteux à un sable un peu de silt Classe SM Argile silteuse	Sol support est réputé géatif.
		4	Classe CH Argile silteuse traces de gravier	ω - 34,0% ω _L - 59,0% ω _p - 25,0% I _p = 34,0 I _l = 0,3
	Rue Agincourt F-05 @ F-07	3	Sol constitué de silt sableux et graveleux Classe ML	
	Rue Kodiak F-08 @ F-10	3	Sol constitué d'argile silteuse @ une Argile silteuse traces de gravier Classe CH	ω - 30,0% ω _L - 53,0% ω _p - 25,0% I _p = 28,0 I _l = 0,2
	Rue Murray (2e tronçon) F-11 et F-12	2	Remblai remanié de sable et silt traces de gravier à gravier silteux Classe CL-ML et GM	Eau souterraine plus prof. que 1,52m Eau souterraine décelé à 0,6m au forage F-12

Annexes VI (suite);Caractérisation des sols, arrondissement de Greenfield Park

Contrats	Rues	Nbre de forage et puits	Nature du sol	Observation
2007-GEN-331 (Cumule des projets dans les arr. de GPK et HUB)	Rue Redmond (Entre rues Payer et Irving) Rue Walnut F-29 @ F-31	9 3	Sol constitué d'un silt argileux traces de sable à une argile silteuse traces de gravier à un sable silteux Classe CL, CH et SM Sol constitué de sable et silt un peu de gravier Classe SM	Sol avec une gélivité passant de gélifié à très gélif Sol considéré comme modérément gélif. Eau souterraine non trouvée et plus prof. que 1,52m
2007-GEN-103	Projet Place du Parc Rue Parklane PE-01 @ PE-12	12	Sol support constitué de silt et sable à une argile silteuse à un silt sableux ou graveleux Classe CL/CH, ML, SM-ML et SM	Des traces de débris se retrouvent sur 9 des 12 forages. Eau souterraine aperçue en surface pour les forages PE-03 @ PE-07, variant de 0,60m @ 1,40m pour les forages PE-08 @ PE-12.

ANNEXE VII

CARACTÉRISATION DES SOLS, ARRONDISSEMENT DE SAINT-HUBERT

Contrats	Rues	Nbre de forage et puits	Nature du sol	Observation
2007-GEN-349	Boulevard Davis LOT 8 (Rue Rocheleau et Loiselle) PIRI phase 1	20	Sol constitué principalement de Silt argileux, un peu de gravier et de sable Classe CL Remblai composé de silt et sable @ sable silteux @ sable un peu de silt Classe CL, CH et ML-CL (F-01) - - - CL (F-08) - - - CL (F-11) - - - CL (F-15) - - - CH Roc situé de 0,60m @ 3,50m Sol non-identifié au forage F-12 (CL)	Sol considéré comme très gélif. Échantillonnage gelé lors des forages (nappe phréatique très haute) Teneur en eau élevée à très élevée, près de la ω_L $\omega \approx 28\%$ Remblai remanié $\omega \approx 13\%$ $\omega - 27,8\% \quad \omega_L - 39,5\% \quad \omega_p - 19,3\%$ $l_p = 20,2 \quad l_i = 0,42$ $\omega - 28,2\% \quad \omega_L - 49,2\% \quad \omega_p - 21,4\%$ $l_p = 27,7 \quad l_i = 0,25$ $\omega - 30,0\% \quad \omega_L - 44,1\% \quad \omega_p - 20,6\%$ $l_p = 23,6 \quad l_i = 0,40$ $\omega - 43,3\% \quad \omega_L - 53\% \quad \omega_p - 19,9\%$ $l_p = 31,0 \quad l_i = 0,27$
S-12266-GE2	Secteur Cousineau et Jacques-Marcoil (Rue Charles-Lacoste et Racine)	10	Puits d'exploration: Eau de surface visible au début de la rue Racine (nappe phréatique très haute) Épaisseur de 0,90m @ 1,60m. Remblai hétérogène en surface Silt sableux, graveleux Classe CL ou ML $\omega \approx 13\%$ Sable silteux et graveleux Classe ML ou SM Roc observé variant de 1,20m @ 3,30m de profondeur	Sol assez dense, couleur brune.
2007-GEN-351	Rue Latour LOT 10b	6	Sol constitué principalement d'argile silteuse Classe CH Remblai: argile silteuse (TF-20-08) - - - CH (TF-23-08) - - - CH Roc non stipulé dans les forages	Sol considéré comme très gélif. $\omega - 30,6\%$ $\omega - 29,1\% \quad \omega_L - 51,8\% \quad \omega_p - 20,8\%$ $l_p = 31,0 \quad l_i = 0,27$ $\omega - 43,3\% \quad \omega_L - 53\% \quad \omega_p - 19,9\%$ $l_p = 33,1 \quad l_i = 0,71$
2007-GEN-351	Boul. Grande-Allée LOT 10c	19	Sol naturel constitué de Till remanié dans son ensemble Classe ML Remblai: Till Rouge - Brun remanié (argile et silt avec un peu de sable et/ou du gravier) (TF-01-08) - - - CL Roc observé variant de 3,00m @ 6,00m de profondeur	Sol considéré comme gélif à très gélif. $\omega \approx 14,8\%$ $\omega - 25,0\% \quad \omega_L - 31,0\% \quad \omega_p - 18,0\%$ $l_p = 13,0 \quad l_i = 0,55$
2009-GEN-327	PRECO LOT 3 Rue Soucy (entre la 9e avenue et le Boul. Maricourt) TF-01-10 @ TF-09-10 et TF-16-10 @ TF-19-10 Chemin Chamby (entre Chagnon et Pinard) TF-10-10 @ TF-15-10	13	Sol support constitué d'un till: Silt et argile traces des gravier à un silt sableux traces de gravier. Couche d'argile silteuse à un silt argileux traces de sable.	Aucune couche de roc trouvée.
		6	Classe CL, CH, ML, CL-ML	TF-12-07 - - - CH $\omega - 22,2\% \quad \omega_L - 51,0\% \quad \omega_p - 24,0\%$ $l_p = 27,0 \quad l_i = 0,00$

Annexes VII (suite);Caractérisation des sols, arrondissement de Saint-Hubert

Contrats	Rues	Nbre de forage et puits	Nature du sol	Observation
2007-GEN-350	Boulevard Davis LOT 9 (Rue Rocheleau et Gaétan-Boucher) PIRI phase 2	21	Sol constitué de Silt argileux, un peu de sable @ sable un peu de silt à silteux Classe CL Quelques fois Classe SM et ML (F-08) - - - CL (F-16) - - - CL	Sols supports considérés gélifs à très gélif. Forage F-03 a une couche de terre végétal sous la fondation de la route $\omega = 13 \text{ à } 30\%$ $\omega = 24,0\% \quad \omega_L = 47,5\% \quad \omega_p = 22,8\%$ $l_p = 24,7 \quad l_i = 0,05$ $\omega = 24,0\% \quad \omega_L = 46,6\% \quad \omega_p = 23,0\%$ $l_p = 23,6 \quad l_i = 0,04$ Aucun remblai remanié décelé
			Roc non atteint dans les forages (Sûrement supérieur à 3,50m)	Eau souterraine vers les 3,50m
2007-GEN-211	Rue Paré (Boul. Davis et Boul. Kimber) TF-55-07 @TF-61-07	7	Sol constitué d'argile silteuse traces de sable Classe CL, CH	Sol de nature gélive. Aucune présence de roc trouvée dans tous les forages (> 3m à 6m)
	Rue Adélaïde (entre Trudeau et Boul. Kimber) TF-31-07 @TF-34-07	4	Sol constitué essentiellement de silt argileux brun Classe CL	
	Rue Latour (entre Trudeau et Boul. Kimber) TF-51-07 @ TF-54-07	4	Sol naturel avec la présence d'un remblai composé de silt argileux un peu de sable Classe CL	
	Rue Coderre (1er tronçon entre ch. Chamby et Coursol) TF-35-07 @ TF-44-07	17	Sol support composé exclusivement d'argile silteuse ou de silt argileux Classe CL	$\omega_N = 21 \text{ et } 40\%$
	Rue Coderre (2e tronçon entre Boul. Kimber et Primot) TF-45-07 @ TF-50-07		Sol support mixte variant d'un silt argileux à un sable et silt Classe CL, SM-ML	$\omega = 28,7\% \quad \omega_L = 46,1\% \quad \omega_p = 23,3\%$ $l_p = 22,7 \quad l_i = 0,24$
	Rue Trudeau (entre Coderre et Rocheleau) TF-62-07 et TF-63-07	2	Sol composé de silt argileux Classe CL	
2009-GEN-108	Futures rues projetées (Rue Des Muscaris, Des Mufliers, Des Molènes et Des Monardes)	13	Sol support contenant un remblai hétérogène en surface, une croûte argileuse ainsi que d'une argile silteuse et d'un dépôt morainique Classe CL, CH	Les couches de l'argile silteuse et du dépôt morainique ont une résistance assez raide (35 @ 60 kPa) avec une plasticité de moyenne à élevée. Aucune couche de roc quelconque n'a pu être décelé Roc > 6,00m
				$\omega = 33,1\% \quad \omega_L = 64,5\% \quad \omega_p = 22,9\%$ $l_p = 41,6 \quad l_i = 0,25$

ANNEXE VIII

TABLEAU DE CLASSIFICATION DES SOLS

Tableau 1101-1
Classification des sols

Principales divisions	Symboles	Description	Critères de classification	
			Code	Symbol
Blocs (B) Éléments > 300 mm	B	Blocs	Si moins de 20 % des éléments sont inférieurs ou égaux à 300 mm, donner au sol la classification «blocs», B.	
	BQ	Blocs et cailloux	Si de 20 % à 50 % des éléments sont inférieurs ou égaux à 300 mm, donner au sol la classification «blocs et cailloux», BQ.	
Cailloux (Q) Éléments > 80 mm et ≤ 300 mm	QB	Cailloux et blocs	Si de 50 % à 80 % des éléments sont inférieurs ou égaux à 300 mm, donner au sol la classification «cailloux et blocs», QB.	
	Q	Cailloux	Si 80 % ou plus des éléments sont inférieurs ou égaux à 300 mm, donner au sol la classification «cailloux», Q.	
Graviers (G) Graviers propres Morts	GW	Gravier bien gradué, mélange gravier-sable. Peu ou pas de grains fins.	$C_u \geq 4$ et $1 \leq C_c \leq 3$	
	GP	Gravier mal gradué, mélange gravier-sable. Peu ou pas de grains fins.	$C_u \geq 4$ ou $1 > C_c > 3$	
Graviers avec grains fins	GM	Gravier siliceux, mélange gravier-sable-silt.	Limites de consistance sous la ligne «A» du diagramme de plasticité de la figure 1101-1 ou indice de plasticité inférieur à 4.	
	GC	Gravier argileux, mélange gravier-sable-argile.	Limites de consistance au-dessus de la ligne «A» du diagramme de plasticité de la figure 1101-1 et indice de plasticité supérieur à 7, figure 1101-1 requérant un symbole double.	
Sables (S) 50 % ou plus passent le tamis de 5 mm (2,5)	SW	Sable bien gradué, mélange sable-gravier. Peu ou pas de grains fins.	$C_u \geq 6$ et $1 \leq C_c \leq 3$	
	SP	Sable mal gradué, mélange sable-gravier. Peu ou pas de grains fins.	$C_u < 6$ ou $1 > C_c > 3$	
Sables avec grains fins	SM	Sable siliceux, mélange sable-silt.	Limites de consistance sous la ligne «A» du diagramme de plasticité de la figure 1101-1 ou indice de plasticité inférieur à 4.	
	SC	Sable argileux, mélange sable-argile.	Limites de consistance au-dessus de la ligne «A» du diagramme de plasticité de la figure 1101-1 et indice de plasticité supérieur à 7, figure 1101-1 requérant un symbole double.	
Silts et argiles $W_L \leq 50$	ML	Silt inorganique, poussière de roche, silt argileux très fin siliceux ou argileux, silt argileux de faible plasticité.	Limites de consistance sous la ligne «A» du diagramme de plasticité de la figure 1101-1 ou indice de plasticité inférieur à 4.	
	CL	Argile inorganique de faible plasticité, argile graineuse, sableuse, siliceuse.	Limites de consistance sous la ligne «A» du diagramme de plasticité de la figure 1101-1 ou indice de plasticité inférieur à 4.	
	OL	Silt organique, mélange silt-argile organique de faible plasticité.	Limites de consistance sous la ligne «A» du diagramme de plasticité de la figure 1101-1 ou indice de plasticité inférieur à 4.	
Silts et argiles $W_L > 50$	MH	Silt inorganique et sable très fin ou siliceux de grande plasticité.	Limites de consistance sous la ligne «A» du diagramme de plasticité de la figure 1101-1 ou indice de plasticité inférieur à 4.	
	CH	Argile inorganique de grande plasticité.	Limites de consistance sous la ligne «A» du diagramme de plasticité de la figure 1101-1 ou indice de plasticité inférieur à 4.	
	OH	Argile organique et silt organique de plasticité moyenne à grande.	Limites de consistance sous la ligne «A» du diagramme de plasticité de la figure 1101-1 ou indice de plasticité inférieur à 4.	
Soils organiques	PT ^f PT _a	Terre noire et autres sols très organiques, tourbe. PT ^f = fibreuse PT _a = amorphe	Limites de consistance sous la ligne «A» du diagramme de plasticité de la figure 1101-1 ou indice de plasticité inférieur à 4.	

Notes :

1. Fraction de sol passant le tamis de 80 µm.
2. Fraction de sol passant le tamis de 80 mm et retenue sur le tamis de 80 µm.
3. Classification basée sur le pourcentage de silt et argile : moins de 5 % passent le tamis de 80 µm : GW, GP, SW, SP. Plus de 12 % passent le tamis de 80 µm : GM, GC, SM, SC. De 5 % à 12 % passent le tamis de 80 µm : symbole double.

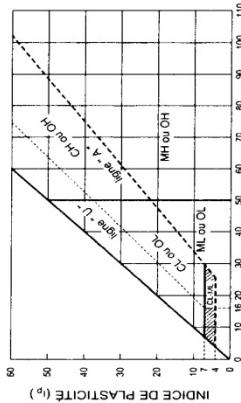


Figure 1101-1
Diagramme de plasticité

Pour la classification des sols à grains fins et de la fraction fine des sols à gros grains. Les limites de consistance situées dans la zone hachurée requièrent un symbole double.

$$\begin{aligned} \text{Équation de la ligne } A: & \text{ horizontale à } I_p = 4 \text{ jusqu'à } W_L = 25,5, \text{ puis } I_p = 0,73 (W_L - 20) \\ \text{Équation de la ligne } A': & \text{ horizontale à } I_p = 7, \text{ puis } I_p = 0,9 (W_L - 8) \\ \text{Équation de la ligne } A'': & \text{ verticale à } W_L = 16 \text{ jusqu'à } I_p = 7, \text{ puis } I_p = 0,9 (W_L - 8) \end{aligned}$$

ANNEXE IX

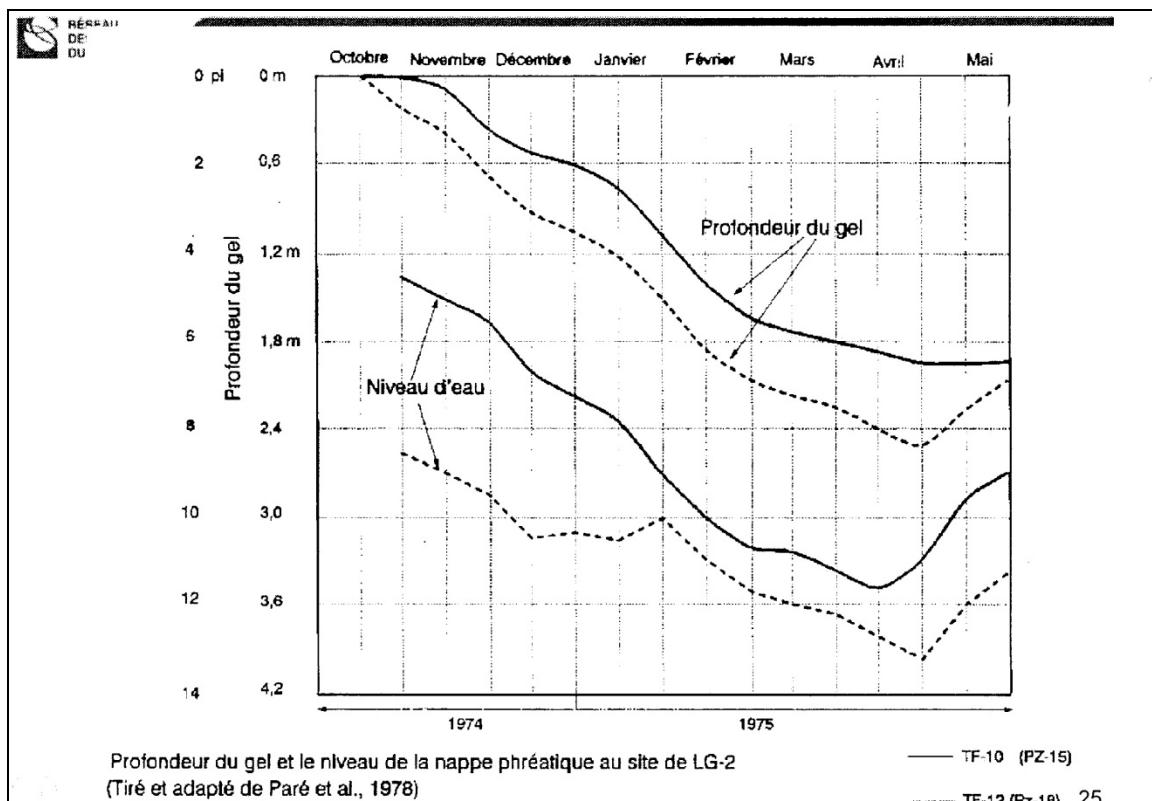
CARACTÉRISTIQUES S'APPLIQUANT AUX ROUTES ET AUX TERRAINS D'AVIATION

Classification des sols													
Principale utilisation	Lettre	Symbole	Dénomination	Géométrie	Possibilité de lissage et de préparation	Caractéristiques du chargement	Engins de compactage	Densité seche D ₀ po	CER	Valeur nominale	Valeur nominale		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)		
	GW	Rouge	Gravier ou cailloutis à granulé fin, très granulé avec peu ou pas de fines	éventail	Bon	bon	norme très difficile	quasi-mulle	éventail	Tracteur à chenilles, rouleau à pneus - rouleau lisse	115-140	40-50	300-500
	GP	Rouge	Gravier ou cailloutis à granulé fin, très granulé avec peu ou pas de fines	bon à excellent	Bon	possible à bon	norme très difficile	quasi-mulle	éventail	Tracteur à chenilles, rouleau à pneus - rouleau lisse	110-140	30-50	300-500
Gravier et sable granulés	GM	Jaune	Gravier siliceux, mélange de granulé fin et très granulé avec peu ou pas de fines	bon à excellent	Bon	possible à bon	très difficile à moyenne	très difficile	possible à très difficile	Rouleau à pneus - tracteur à pneus - rouleau à pneus - rouleau lisse	125-145	40-60	300-500
Sols à granulé grossier	GS	Jaune	Gravier siliceux, mélange de granulé fin et très granulé avec peu ou pas de fines	bon	Bon	possible	norme à très difficile	très difficile	possible à très difficile	Rouleau à pneus - tracteur à pneus - rouleau à pneus - rouleau lisse	115-135	30-40	200-300
Sols à granulé moyen	GM	Rouge	Sol en sable granulé, bien granulé avec peu ou pas de fines	bon	bon	possible à bon	norme à très difficile	très difficile	possible à très difficile	Rouleau à pneus - tracteur à pneus - rouleau à pneus - rouleau lisse	130-145	30-40	300-500
Sols et sables grossiers	SG	Jaune	Sol en sable granulé, mal granulé avec peu ou pas de fines	possible à bon	possible	possible à bon	norme à très difficile	très difficile	possible à très difficile	Rouleau à pneus - tracteur à pneus - rouleau à pneus - rouleau lisse	110-130	30-40	200-300
Sols et sables moyens	SM	Jaune	Sol en sable, mélange de sable et silice	possible à bon	possible à bon	possible à bon	norme à très difficile	très difficile	possible à très difficile	Rouleau à pneus - tracteur à pneus - rouleau à pneus - rouleau lisse	105-135	30-40	150-400
Sols et sables	SC	Jaune	Sol en sable, mélange de sable et silice	possible	Médiocre à possible	Médiocre à possible	norme à très difficile	très difficile à moyenne	possible à très difficile	Rouleau à pneus - tracteur à pneus - rouleau à pneus - rouleau lisse	120-135	30-40	150-400
Sols et sables LL < 0	CL	Ven	Sol non organique et très très fin, frire de cire, sol en silice ou argileux, ou sol argileux peu plastique	Médiocre à possible	imperméable	imperméable	norme à très difficile	très difficile à moyenne	possible à très difficile	Rouleau à pneus - tracteur à pneus - rouleau à pneus - rouleau lisse	100-135	30-40	100-300
Sols et sables	CL	OL	Sol organique et siliceux, le sol de la plaine	Médiocre	imperméable	imperméable	norme à très difficile	très difficile	possible à très difficile	Rouleau à pneus - tracteur à pneus - rouleau à pneus - rouleau lisse	105-135	30-40	100-300
	ME	Blanc	Sol non organique, sol sableux fin ou siliceux ou à silice, ou siliceuse ou à silice	Médiocre	imperméable	imperméable	norme à très difficile	très difficile	possible à très difficile	Rouleau à pneus - tracteur à pneus - rouleau à pneus - rouleau lisse	90-130	15 ou moins	50-150
	CH	Or	Argile non organique à plastique siliceuse, argile siliceuse, argile marge	Médiocre à possible	imperméable	imperméable	norme à très difficile	très difficile	possible à très difficile	Rouleau à pneus - tracteur à pneus - rouleau à pneus - rouleau lisse	90-115	15 ou moins	50-150
Sols très organiques	PI	Orange	Tourbe et autres sols très organiques	imperméable	imperméable	imperméable	très difficile	très difficile	possible à très difficile	Compactage impossible	—	—	—

Source: Ce tableau est tiré du manuel géotechnique militaire, numéro d'index B-GL-361-011/FP-002, chapitre 5, page 162, Publiée avec l'autorisation du Chef d'état-major de la Défense, BPR : DDAT 8 1998-06-15.

ANNEXE X

PROFONDEUR DU GEL ET NIVEAU DE LA NAPPE PHRÉATIQUE



Source: Cette figure est tirée du document de formation du RIQ «Dimensionnement et conception géotechnique des chaussées pour les régions nordiques», Montréal, 21 avril 2010.

ANNEXE XI

DONNÉES DE TRAFIC

Données Trafix 2004					Données comptages 2005			Valeurs choisies par la Ville 2006		
Classification	Arrondissement	Vocation	Débit moyen	% de camions journalier (véh/jour)	Débit moyen	% de camions journalier	Facteur d'agressivité	Débit moyen	% de camions journalier	Facteur d'agressivité
			journalier		révisé 2006		révisé 2006	révisé 2006		
Locales	Tous	Tous	1 250	< 2%	1,1	1 250	< 2%	1,1	1 250	< 2%
Collectrices	Tous	Tous	4 000	< 3%	1,1	5 613	< 3%	1,1	5 000	< 5%
Artères secondaires	BOU et VLO	Industriel	10 600	10%	1,1	9 019	10%	1,1	10 600	10%
Artères secondaires	BOU et VLO	Autre qu'industriel	10 600	± 3%	1,1	8 912	± 3%	1,1	10 600	± 5%
Artères secondaires	BRO, GPK, STB, STH, ET STL	Tous	10 600	± 3%	1,1	8 262	± 3%	1,1	10 600	± 5%
Artères principales	BOU, BRO, STH et VLO	Industriel ³	9 900	entre 9% et 16%	1,1	14 436	entre 9% et 16%	1,1	12 500	entre 9% et 16%
Artères principales	VLO	Agricole	10 600	10%	1,1	10 600	10%	1,1	10 600	8%
Artères principales	VLO	Commercial et résidentiel	16 500	± 3,5%	1,1	18 230	± 3,5%	1,1	16 500	± 5,5%
Artères principales	BOU, BRO, STH	Autre qu'industriel	16 500	± 3,5%	1,1	12 035	± 3,5%	1,1	14 000	± 5,5%
Artères principales	STB, STL et GPK	Tous	16 500	± 3,5%	1,1	16 500	± 3,5%	1,1	14 000	± 5,5%

Source; Ce tableau est adaptée du Programme d'inventaire et d'entretien des infrastructures municipales, mis à jour par le consortium et le service de la planification de la Ville de Longueuil (2006).

ANNEXE XII

M_r EFFECTIF SELON LA MÉTHODE DU DOMMAGE ÉQUIVALENT (AASHTO 1993)

a) Exemple pour sol de type ML, ML-CL ou CL (IP ₆ ≤12)			b) formulaire vierge		
Mois	Mr, MPa	u _f	Mois	Mr, MPa	u _f
Janvier	140	0,01	Janvier		
	140	0,01			
Février	140	0,01	Février		
	140	0,01			
Mars	140	0,01	Mars		
	20,7	1,01			
Avril	20,7	1,01	Avril		
	21,7	0,90			
Mai	23,3	0,77	Mai		
	25,9	0,60			
Juin	31,0	0,39	Juin		
	38,8	0,24			
Juillet	46,5	0,15	Juillet		
	49,6	0,13			
Août	51,7	0,12	Août		
	51,7	0,12			
Septembre	51,7	0,12	Septembre		
	51,7	0,12			
Octobre	49,1	0,14	Octobre		
	45,5	0,16			
Novembre	42,9	0,19	Novembre		
	41,4	0,20			
Décembre	41,4	0,20	Décembre		
	140	0,01			
Somme :			Somme :		
Moyenne :			Moyenne :		
M _r effectif :			M _r effectif :		

$$u_f = 1,18 \cdot 10^8 \cdot (145,05 - Mr)^{-2,32}$$

$$u_f = 1,18 \cdot 10^8 \cdot (145,05 - Mr)^{-2,32}$$

Source; Ce tableau est tiré du guide de l'utilisateur: «Chaussée 2», logiciel de dimensionnement des chaussées souples, MTQ, 2006.

ANNEXE XIII

DISTRIBUTION DES CAMIONS SUR DES ROUTES À VOIES MULTIPLES

DJMA projeté (une direction)	Route à deux voies (une direction)		Route à trois voies et plus (une direction)		
	Gauche	Droite	Gauche	Centre	Droite
2 000	6	94	6	12	82
4 000	12	88	6	18	76
6 000	15	85	7	21	72
8 000	18	82	7	23	70
10 000	19	81	7	25	68
15 000	23	77	7	28	65
20 000	25	75	7	30	63
25 000	27	73	7	32	61
30 000	28	72	8	33	59
35 000	30	70	8	34	58
40 000	31	69	8	35	57
50 000	33	67	8	37	55
60 000	34	66	8	39	53
70 000	---	---	8	40	52
80 000	---	---	8	41	51
100 000	---	---	9	42	49

Source; Ce tableau est tiré du Guide de l'utilisateur: «Chaussée 2», logiciel de dimensionnement des chaussées souples, MTQ, 2006.

ANNEXE XIV

DÉTAIL DE CALCUL DU LOGICIEL WIN-PAS

The screenshot shows two help dialog boxes from the Rigid Pavement Design software.

Help Screen for the Overall Deviation

The Overall Deviation, or Standard Deviation as it is commonly called, is a coefficient which describes how well the AASHTO Road Test data fits the AASHTO Design Equations. In other words, the lower the overall deviation, the better your equations model your data. The following ranges are recommended by AASHTO:

For Rigid Pavements:
0.35 New Construction
0.39 Overlays

For Flexible Pavements:
0.45 New Construction
0.49 Overlays

Overall Deviation

Help Screen for the Load Transfer

The following modified AASHTO load transfer coefficients are recommended by the American Concrete Pavement Association:

E 18's Millions	Dowelled Joints		Aggregate Interlock		Continuously Reinforced		Pavement Class
	Edge Support No	Yes	Edge Support No	Yes	Edge Support No	Yes	
Up to 0.3	3.2	2.7	3.2	2.8	---	---	Local Streets & Roads
0.3 to 1	3.2	2.7	3.4	3.0	---	---	
1 to 3	3.2	2.7	3.6	3.1	---	---	
3 to 10	3.2	2.7	3.8	3.2	2.9	2.5	Arterials
10 to 30	3.2	2.7	4.1	3.4	3.0	2.6	and
over 30	3.2	2.7	4.3	3.6	3.1	2.6	Highways

Load Transfer, J

Annexes XIV (suite); Détail de calcul du logiciel *Win-Pas*

Rigid Pavement Design

Help Screen for Subgrade Analysis - Rigid

Material Type	Resilient Modulus (psi)
Cement Treated Granular Base	1,000,000 - 2,000,000
Cement Aggregate Mixture	500,000 - 1,000,000
Asphalt Treated Base	350,000 - 1,000,000
Bituminous Stabilized Mixture	40,000 - 300,000
Lime Stabilized Base	20,000 - 70,000
Unbound Granular Materials	15,000 - 45,000
Fine Graded or Natural Subgrade	3,000 - 40,000

(1MPa = 145psi)

1) Resilient Modulus of the Subgrade = MPa

2) Resilient Modulus of the Base = MPa (Leave blank if none)

3) Base Thickness (4 to 12 inches) = mm

4) Depth to Rigid Foundation = m (Leave blank if > 10 feet)

5) Loss of Support (0, 1, 2, or 3) =

>> Modulus Of Subgrade Reaction, k = 182.4 MPa/m

Rigid Pavement Design

Help Screen for the Modulus of Elasticity

The Modulus of Elasticity of the concrete can be approximated based on the Modulus of Rupture, Sc' , as follows:

$$Ec = 6,750 \times Sc' \text{ psi}$$

Modulus of Rupture, psi	Modulus of Elasticity, psi
500	3,400,000
550	3,700,000
600	4,100,000
650	4,400,000
700	4,700,000
750	5,100,000
800	5,400,000

Modulus of Elasticity MPa

ANNEXE XV

CARTES DE CARACTÉRISATION DES SOLS DE LA VILLE DE LONGUEUIL

1/ Arrondissement de Vieux Longueuil et de Greenfield Park

2/ Arrondissement de Saint-Hubert

BIBLIOGRAPHIE

- AASHO "American Association of State Highway Officials". 1962. *The AASHO Road Test History and Description of Project, Special Report of Highway Research Board*. National Research Council, Highway Research Board. Washington, D.C.: AASHO.
- AASHTO "American Association of State Highway and Transportation Officials". 1986. *Guide for Design of Pavement Structures - 1986*. Washington, D.C. : AASHTO.
- AASHTO "American Association of State Highway and Transportation Officials". 1993. *Guide for Design of Pavement Structures 1993*. Washington, D.C.: A ASHTO.
- ACPA "American Concrete Pavement Association". 2001. *WinPAS, User guide Version 1.0.3*. Skokie, IL : American Concrete Pavement Association.
- Assaf, Gabriel J et Marc Contan. 1994. *Catalogue de dimensionnement structural des chaussées neuves : Ville de Montréal*. Montréal : École de technologie supérieure, 159 p.
- Assaf, Gabriel J, Tarek Agal et François Marleau. 2005. *Catalogue de dimensionnement des aires de circulation et de chargement en béton compacté au rouleau*. 40e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, AQTR, 1-32.
- Assaf, Gabriel J. « *Qu'est ce que la capacité portante du sol?* ». Synergie, 2007. Vol. 6, n° 2 p. 3.
- AIPCR. 2008. *Quantification des impacts socio-économiques et environnementaux des projets routiers*. Comité technique AIPCR C1.1 Aspects économiques des réseaux routiers. 2008R19. Paris: Association mondiale de la route.
- AQTR "Association Québécoise du Transport et des Routes". 2008. « *Dimensionnement structural des chaussées souples : Logiciel Chaussées souples* » : Formation continue. Montréal : AQTR. 123 p.
- AQTR "Association Québécoise du Transport et des Routes ". 2009. « *Point de mire sur les travaux de la direction du laboratoire des chaussées (DLC) du MTQ* » : Colloque. Drummondville : AQTR. 118 p.
- Agal, Tarek. 2005. « Développement d'un catalogue de dimensionnement structural des chaussées pour la Ville de Montréal ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 211 p.

- Blond, Eric, Jacek Mlynarek, Michel Brodeur et Luc Chartrand. 2000. « Comportement hivernal et printanier de différentes structures de chaussées municipales isolées et drainées, sur la rue Nelson, à St-Hyacinthe ». In *Journée du bitume 2000*. (St-Hyacinthe, 21 mars 2000), p. 1-19. St-Hyacinthe (Qc) : Bitume Québec.
- Bureau de normalisation du Québec. 2002. *Travaux de génie civil - Granulats*, 1^{ère}éd. Norme provinciale du Québec. NQ 2560-114/2002. Québec (Qc.) : Bureau de normalisation du Québec, 67 p.
- Cameron, George, et Gabriel J. Assaf. 2008. « Le Béton Compacte au Rouleau haute performance dans la province de Québec ». In *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering 2008 - "Partnership for Innovation"* Quebec City, QC, Canada, June 10, 2008 - June 13, 2008. Vol. 3, p. 1808-1817. Montréal, Québec, Canada: Canadian Society for Civil Engineering.
- CCTG. 2009. *Cahier des Clauses Techniques Générales : construction des chaussées, bordures et trottoirs*. Longueuil : Ville de Longueuil, 54 p.
- CETE Normandie Centre/ SETRA-CSTR. 1992. *Drainage des chaussées : le guide technique Écrans drainants en rives de chaussées (E.D.R.C.)*. « Publications du SETRA ». D9237. Bagneux (France) : Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA). 6 p.
- CERIU. 2002. Chaussées. Coll. *Les classeurs du CERIU*. Montréal : CERIU, pagination multiple 179 p.
- Chartrand, Luc. 2005. « Étude de 1700 kilomètres de chaussées souples du réseau routier de la Ville de Longueuil : constatation et recommandations ». In *Journée du Bitume*. (Québec, Mars 2005), p. 1-4. Québec (Qc) : Bitume Québec.
- Chartrand, Luc. 2008. « Impact de l'entretien sur la durabilité des chaussées ». In *Journée du Bitume*. (Québec, Mars 2008), p. 1-11. Québec (Qc) : Bitume Québec.
- Cheneviere, Philippe, et Vijay Ramdas. 2006. « Cost benefit analysis aspects related to long-life pavements ». *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 7, n° 2, p. 145-152.
- COST 333. 1999. *Development of New Bituminous Pavement Design Method*. Final report of the action. Bruxelles : European Commission.
- C-SHRP Canadian Strategic Highway Research Program. 1999. *Tendances à la rugosité des chaussées expérimentales des sites LTPP du C-SHRP*. C-SHRP Bulletin technique n° F18 . Ottawa (Ont.) : C-SHRP, 8 p.

C-SHRP Canadian Strategic Highway Research Program. 2000. Conception et rendement des chaussées : Questions de l'heure et besoins en recherches. C-SHRP Bulletin de recherche n° F2. Ottawa (Ont.) : C-SHRP, 10 p.

C-SHRP Canadian Strategic Highway Research Program. 2002. *Pavement Structural Design Practices Across Canada. C-SHRP Technical Brief n°23*. Ottawa (Ont.): C-SHRP, 10 p.

Consortium Dessau-Soprin et Groupe SM. 2004. *Rapport final; Programme d'inventaire et d'entretien des infrastructures municipales de la Ville de Longueuil : Chaussées, égouts et aqueduc*, Volumes 1 et 2. 515079-260-VR-001 Rév. 01. Juillet 2004. Longueuil : Dessau-Soprin, Groupe SM, pagination multiple 572 p.

Consortium Dessau-Soprin et Groupe SM. 2006. *Rapport final : mise à jour; Programme d'inventaire et d'entretien des infrastructures urbaines : Chaussées, égouts et aqueduc*, Rapport final. 056-P004115-0402-VR-0001-00. Octobre 2006, Longueuil : Dessau-Soprin, Groupe SM, pagination multiple 56 p.

Défense Nationale Canada. 1998. Génie de campagne : *Géotechnique militaire. Manuel*, B-GL-361-011/FP-002. Ottawa (Ont.) : Défense Nationale Canada, 460 p.

Direction du Laboratoire des chaussées. 1996. « *Protection du réseau routier durant la période de gel* ». Bulletin d'information technique, Vol. 1, n° 6, p. 1-2.

Direction du Laboratoire des chaussées. 1997. « *Limites du drainage latéral pour contrer les soulèvements différentiels dus au gel* ». Bulletin d'information technique, Vol 2, n° 8, p. 1-2.

Direction du Laboratoire des chaussées. 2002. « *Le potentiel de ségrégation SP et la gélivité des sols* ». Bulletin d'information technique, Vol. 7, n° 2, p. 1-2.

Direction du Laboratoire des chaussées. 2002. « *Analyse du comportement hydrique d'une structure de chaussée par simulations numériques* ». Bulletin d'information technique, Vol. 7, n° 10, p. 1-2.

Direction du Laboratoire des chaussées. 2004. « *Chaussée souple à durée prolongée* ». Bulletin d'information technique, Vol. 9, n° 9, p. 1-2.

Direction du Laboratoire des chaussées. 2005. « *Choix des composants d'enrobés selon l'usage* ». Bulletin d'information technique, Vol. 10, n° 4, p. 1-2.

Direction du Laboratoire des chaussées. 2006. « *Bilan de la performance des chaussées en béton de ciment au MTQ 1994-2006* ». Bulletin d'information technique, Vol. 11, n°7, p.1-3.

- Dysli, Michel. 1997. *B2-2 : Mécanique des sols : Notes du cours B2-2. Cycle postgrade : Géologie appliquée à l'ingénierie et à l'environnement.* Lausanne : École polytechnique fédérale, 79 p.
- Fwa, Tien F., et Kumares C. Sinha. 1991. « *Pavement performance and life-cycle cost analysis* ». *Journal of Transportation Engineering*, vol. 117, n° 1, p. 33-46.
- Haas, Ralph C. G., et Association des transports du Canada. 1997. *Pavement design and management guide*. Ottawa: Transportation Association of Canada, 389 p.
- Huang, Yang H. 1993. *Pavement analysis and design*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 805 p.
- Jeuffroy, Georges. 1983-1985. *Conception et construction des chaussées*, 5e rev. et corr éd., Tomes : t.1 Les véhicules, les sols, le calcul des structures - t. 2 Les matériaux, les matériels, les techniques d'exécution des travaux. Paris: Eyrolles.
- Konrad, Jean-Marie. 2000. *Assessment of subgrade frost susceptibility from soil index properties*. Recueil des communications, 9'th international symposium on ground freezing, La-Neuve, Belgique, 11-13 septembre 2000, 89-94.
- LCPC "Laboratoire Central des Ponts et Chaussées". 1994. *Conception et dimensionnement des structures de chaussées : Guide Technique*. LCPC-SETRA, Paris, 1^{er} décembre 1994, 266 p.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources. 1977. *Levé géotechnique de la région de Boucherville – Tracy*, réalisé par D.J. Dion. Québec : Ministère de l'Énergie et des Ressources.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources. 1980. *Aptitude : Région de La Prairie-Saint-Jean*, réalisé par D.J. Dion et P. Caron. 1:50000; Carte A (n° 1975) du DPV-901. Québec (Qc.) : Ministère de l'Énergie et des Ressources.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources. 1980. *Géologie des dépôts meubles: Région de La Prairie-Saint-Jean*, réalisé par D.J. Dion et P. Caron. 1:50000; Carte B du DPV-901. Québec (Qc.) : Ministère de l'Énergie et des Ressources.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources. 1982. *Levé géotechnique de la région de La Prairie – Saint-Jean*, réalisé par D.J. Dion et P. Caron. Québec : Ministère de l'Énergie et des Ressources.
- Ministère des Transports du Québec. 2006. *Dimensionnement des chaussées souples. Version 2.0*. Logiciel. Québec : MTQ.

Ministère des Transports du Québec. 2009. *Classification des sols. Norme provincial du Québec. VII-1-1011*. Québec (Qc.) : Transports Québec, 4 p.

Ministère des transports du Québec. 2009. *Normes - Ouvrages routiers : Tome VII - Matériaux*. 71^{ème} Mise à jour. Québec : Publications du Québec.

Ministère des transports du Québec. 2010. *Normes - Ouvrages routiers : Tome I - Conception routière*. 75^{ème} Mise à jour. Québec : Publications du Québec.

Ministère des transports du Québec. 2010. *Normes - Ouvrages routiers : Tome II - Construction routière*. 74^{ème} Mise à jour. Québec : Publications du Québec.

Pierre Pascale, Guy Doré et Sylvain Juneau. 2004. « *Évaluation de la performance des chaussées revêtues de pavés de béton* ». Contact Plus, n° 57, p. 17-25.

Ministère des travaux publics - Direction des routes. 2001. *Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves : Fascicule 1*, Notice d'utilisation. Alger : CTTP, 31 p.

Ministère des travaux publics - Direction des routes. 2001. *Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves : Fascicule 2*, Hypothèses et données de dimensionnement. Alger : CTTP, 22 p.

Ministère des travaux publics - Direction des routes. 2001. *Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves : Fascicule 3* : Fiches techniques de dimensionnement. Alger : CTTP, 99 p.

Nesnas, Kamal et Mike Nunn. 2005. « *Modelling time dependant behavior of asphalt and pavement permanent deformation under a rolling wheel* ». Transport Research Foundation of United Kingdom. En ligne. 8 p.
http://www.transportresearchfoundation.co.uk/PDF/Infrastructure/Nesnas_28200529_Modelling_time_dependent.pdf >. Consulté le 13 Janvier 2010.

Perret, Jacques. 2003. « Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic ». Doctorat ès sciences, Lausanne, École polytechnique fédérale, 237 p.

Peyronne, Christian et Gilbert Caroff. 1991. *Dimensionnement des chaussées 2e édition*. Paris : Presse de l'École nationale des ponts et chaussées. 244p.

Rajbongshi, Pabitra, et Animesh Das. 2008. « Optimal asphalt pavement design considering cost and reliability ». *Journal of Transportation Engineering*, vol. 134, n° 6, p. 255-261.

Réseau des ingénieurs du Québec. 2010. *Dimensionnement et conception géotechnique des chaussées pour les régions nordiques*: formation continue. Montréal : Réseau des ingénieurs du Québec. 233 p.

- Roy, Jean-Philippe 2009. « Modélisation des coûts aux usagers du réseau routier québécois ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 275 p.
- SETRA. 1986. *Influence des caractéristiques d'infrastructure sur la sécurité : acquis récents de la recherche*. Rapport technique, B-C 28. Bagneux (France) : SETRA, 7 p.
- SETRA. 2009. *Incidences des Poids Lourds sur les coûts de construction des chaussées neuves*. Rapport d'études, 0917W. Bagneux (France) : SETRA, 71 p.
- Smith, Kelly L., Leslie Titus-Glover, Michael I. Darter, Harold Von Quintus, Richard Stubstad et Larry Scofield. 2005. « *Cost-benefit analysis of continuous pavement preservation design strategies versus reconstruction* ». *Transportation Research Record*, n° 1933, p. 83-93.
- St-Laurent, Denis. 2006. *Manuel de l'utilisateur; Logiciel de dimensionnement des chaussées souples, Chaussée 2*. Québec: Ministère des transports, 66 p.
- St-Laurent, Denis. 2004. *Guide d'utilisation des géosynthétiques de séparation et de renforcement des chaussées*. Québec: Ministère des transports, 40 p.
- St-Laurent, Denis, et Marius Roy. 1995. *Évaluation structurale de chaussées souples dans un contexte climatique nordique* : rapport GCS-95-05 : recherche contractuelle pour le Ministère des Transports du Québec Contrat # 1220-93-RD01. Sainte-Foy, Québec: Université Laval Département de génie civil, 238 p.
- Tao, Mingjiang, Zhongjie Zhang et Zhong Wu. 2008. « *Simple procedure to assess performance and cost benefits of using recycled materials in pavement construction* ». *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 20, n° 11, p. 718-725.
- Tessier, G-Robert., 1990. *Guide de construction et d'entretien des chausses*. Montréal : Association quebecoise du transport et des routes << AQTR >>.
- Tran, Quang Dat. 2004. « Modèle simplifié pour les chaussées fissurées multicouches ». Doctorat en sciences, Paris, École nationale des ponts et chaussées, 160 p.
- Turgeon, Jean-Pierre, Pierre-Louis Maillard. 2009. « *Les chaussées municipales en béton* ». Association québécoise du transport et des routes 44^{ème} Congrès. (Montréal, Avril 6-8 2009). En ligne. 12 p.
http://www.aqtr.qc.ca/documents/Congres_2009/pdfs/Texte_JeanPierreTurgeon.pdf. Consulté le 18 décembre 2009.

- U.S. Department of transportation. 2006. *Geotechnical Aspects of Pavements, Reference Manual*. En ligne.
< <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/05037/ac.cfm> >. National Highway Institute: U. S. Department of transportation. Consulté le 18 fevrier 2010.
- Vaillancourt, Michel et Daniel Perraton. 2010. « *Dimensionnement des chaussées au Québec, l'avenir est dans l'exploitation des méthodes disponibles* ». En ligne. 19 p. http://www.aqtr.qc.ca/documents/Congres_2009/pdfs/Texte_Michel_Vaillancourt.pdf. consulté le 23 janvier 2010.
- Washington Asphalt Pavement Association. 2003. « *WAPA Asphalt Pavement Guide* ». In Washington Asphalt Pavement Association web site. En ligne.
< http://www.asphaltwa.com/wapa_web/index.htm >. consulté le 07 Octobre 2009.
- Yoder, Eldon J. et Matthew W. Witczak 1975. *Principles of pavement design*. New York, N.Y., J. Wiley and Sons. 711p.