

**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
M. Ing.**

**PAR
CAMMISANO, Dominic**

**DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DIAGNOSTIC ET
DE CONFIRMATION DES CAUSES DE DÉTÉRIORATION
DES CHAUSSEES FLEXIBLES**

MONTREAL, LE 27 AOÛT 2007

© Dominic Cammisano, 2007

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**

**Mme Michèle St-Jacques, présidente du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure**

**M. Patrick Guénette, membre du jury
Directeur – Gestion déléguée de réseaux, Dessau-Soprin inc.**

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

LE 19 JUILLET 2007

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je désire remercier M. Gabriel J. Assaf d'avoir accepté le titre de directeur de mémoire. L'enthousiasme avec lequel il transmet son vaste champ de connaissances en génie routier a indéniablement contribué à la satisfaction que j'éprouve à l'égard du programme de Maîtrise en génie de la construction. Pendant l'écriture de ce mémoire, les judicieux conseils transmis par monsieur Assaf, jumelés aux attentes de l'école pour le dépôt d'un mémoire, m'ont poussé à parfaire mes qualités de rédaction à un niveau plus élevé qu'attendu. Grâce à ses expériences techniques en matière de diagnostic des chaussées flexibles, monsieur Assaf a su me guider vers la réussite de la rédaction du présent mémoire. Aussi, je veux remercier Mme Diane Marcoux et Mme Isabelle Racine pour les heures de travail administratif qu'elles ont gentiment accepté de consacrer à cet ouvrage pour m'aider à le compléter.

Plus spécialement, je désire dédier ce mémoire à la femme de ma vie, Nancy. Elle a su me soutenir durant les périodes de recherche intensive et c'est avec une confiance inébranlable qu'elle a cru en moi durant les nombreux mois de rédaction. Je suis grandement redevable pour tout l'encouragement qu'elle m'a généreusement communiqué pendant les trois années de travail acharné qui m'ont mené à l'aboutissement de cet ambitieux mémoire de maîtrise. Également, je désire remercier mes parents pour le soutien moral qu'ils ont entretenu tout au long de mes études supérieures universitaires.

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DIAGNOSTIC ET DE CONFIRMATION DES CAUSES DE DÉTÉRIORATION DES CHAUSSEES FLEXIBLES

CAMMISANO, Dominic

RÉSUMÉ

Dans tous les cas, les routes se dégradent à cause du trafic et du climat. Cet ouvrage est consacré exclusivement à l'étape du diagnostic des causes et aux choix des essais qui permettront d'affirmer leur présence ou pas. L'outil de diagnostic ainsi développé permet l'affirmation des causes spécifiques, qui ont engendré les défauts de surface, par l'exécution d'essais destinés à caractériser la structure subissant le mécanisme de dégradation. L'approche systémique du diagnostic proposé par l'outil assure l'impartialité des résultats obtenus par l'analyse des dégradations en surface, des caractéristiques structurales, de la nature du sol support et du trafic. Dans le but de regrouper l'importante quantité d'informations contenues dans la littérature sur les causes, les défauts et les essais en un outil complet, la notion de famille a été utilisée afin de ramifier les liens entre les trois catégories. La méthode choisie permet l'affirmation automatique de la présence d'une cause dans une structure et élimine les points de vue divergents concernant la source d'un symptôme observé à la surface du tronçon routier diagnostiqué.

Mots-clés : chaussée, flexible, défaut, cause, essai, diagnostic, outil.

DÉVELOPPEMENT OF A TOOL OF DIAGNOSIS AND CONFIRMATION OF CAUSES OF DETERIORATION FOR FLEXIBLE ROADWAYS

CAMMISANO, Dominic

ABSTRACT

All roads deteriorate due to the effect of traffic and the environment. This work is devoted exclusively to the diagnosis of the causes of deterioration and the selection of tests which will make it possible to confirm or reject their presence. The tool for diagnosis thus developed allows the assertion of the specific causes, which generated the distress, by performing tests intended to characterize the structure subjected to the mechanism of degradation. The systemic approach of the diagnosis suggested by the tool ensures the impartiality the results obtained by the analysis of surface distress, the structural characteristics, the nature of the soil support and the traffic. The objective of gathering the relevant information available in the literature on the causes, the distress and the tests in an integrated complete tool, the concept of families was used in order to ramify the bonds between the three categories. The selected method allows the automatic assertion of the presence of cause in a structure and eliminates the diverging points of view concerning the source of a symptom observed on the surface of the diagnosed road section.

Key words : roadway, flexible, device, defect, cause, test, diagnosis, tool.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	7
1.1 Revue de littérature	7
CHAPITRE 2 DÉFAUTS DE SURFACE D'UNE CHAUSSEE FLEXIBLE.....	15
2.1 Présentation des familles de défauts.....	15
2.1.1 D1 – Fissures transversales / mailles / carrelages.....	15
2.1.2 D2 – Fissures longitudinales	16
2.1.3 D3 – Défauts du revêtement.....	17
2.1.4 D4 – Défauts et fissuration dans les pistes de roues.....	19
2.1.5 D5 – Désordre du profil	22
2.2 Organigramme des familles de défauts	24
CHAPITRE 3 CAUSES DES DÉFAUTS D'UNE CHAUSSEE FLEXIBLE	27
3.1 Présentation des familles de causes.....	27
3.1.1 C1 – Enrobés bitumineux.....	31
3.1.2 C2 – Structure de chaussée.....	33
3.1.3 C3 – Drainage	36
3.1.4 C4 – Sol support	39
3.1.5 C5 – Infrastructures souterraines	43
3.1.6 C6 – Travaux et mise en œuvre.....	46
3.2 Organigramme des familles de causes	49
3.3 Synthèse des liens entre les causes et les défauts.....	53
3.3.1 Tableau, organigramme et matrice synthèse	53
CHAPITRE 4 ESSAIS À RÉALISER SUR UNE CHAUSSEE FLEXIBLE	58
4.1 Présentation des groupes d'essais	58
4.1.1 G1 – Observation visuelle.....	60
4.1.2 G2 - Historique du tronçon.....	63
4.1.3 G3 – Estimation du trafic	66
4.1.4 G4 – Essais non destructifs	68
4.1.5 G5 – Carottage de la chaussée.....	72
4.1.6 G6 – Essais du laboratoire des chaussées	73
4.1.7 G7 – Caractérisation et autres.....	75
4.1.8 G8 – Forage des couches de sols	76
4.2 Synthèse des liens entre les essais et les causes.....	77
4.2.1 Organigramme et matrice synthèse.....	80
CHAPITRE 5 PRÉSENTATION DE L'OUTIL	84
5.1 Présentation de l'outil de diagnostic	84

5.1.1	Organigramme du diagnostic par l'utilisation de l'outil	89
5.1.2	Méthode d'application de l'organigramme	91
5.1.2.1	Étape 1) Familles de causes possibles à affirmer	92
5.1.2.2	Étape 2) Causes à affirmer	92
5.1.2.3	Étape 3) Cause valide le défaut	95
5.1.2.4	Étape 4) Conserver la cause pour analyses futures	97
CHAPITRE 6 VALIDATION DE L'OUTIL		99
6.1	Description de la méthode	99
6.2	Exemples de validation	101
6.2.1	Premier exemple de validation	101
6.2.2	Deuxième exemple de validation	112
6.2.3	Troisième exemple de validation	126
CONCLUSION		138
ANNEXE I	ESSAIS RÉALISABLES SUR LES CHAUSSEES FLEXIBLES	144
ANNEXE II	ORGANIGRAMME DE LIAISON ENTRE LES FAMILLES DE DÉFAUTS ET LES GROUPES D'ESSAIS	160
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		169

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1 Comparaison des réseaux routiers gérés par l'État.....	28
Tableau 3.2 Tableau synthèse des liens entre les familles de causes et de défauts	54
Tableau 3.3 Matrice synthèse des causes qui valident les défauts	56
Tableau 3.3 Matrice synthèse des causes qui valident les défauts (suite).....	57
Tableau 4.1 Liste des groupes d'essais	79
Tableau 4.2 Tableau synthèse permettant d'affirmer les familles de causes	81
Tableau 4.3 Matrice synthèse permettant d'affirmer les familles de causes.....	82
Tableau 4.3 Matrice synthèse permettant d'affirmer les familles de causes (suite)	83
Tableau 6.1 Étape 4) Consignation des informations du premier exemple	110
Tableau 6.2 Étape 4) Consignation des informations du deuxième exemple	124
Tableau 6.3 Étape 4) Consignation des informations du troisième exemple	136

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1	Fissures transversales à gauche et fissures en mailles à droite.....16
Figure 2.2	Fissure longitudinale rectiligne à gauche, fissures de gel au centre et fissures de rive à droite17
Figure 2.3	Désenrobage à gauche et pelade à droite18
Figure 2.4	Ressuage à gauche et nids-de-poule à droite.....18
Figure 2.5	Position des roues lors du passage d'un véhicule et fissures dans les pistes de roues.....20
Figure 2.6	Ornières à faible rayon à gauche et à grand rayon à droite21
Figure 2.7	Affaissement à gauche et désordre du profil à droite.23
Figure 2.8	Fissuration autour d'un accès, dénivellation autour d'un accès et bosse ou soulèvement différentiel24
Figure 2.9	Défauts des chaussées flexibles – Défauts-familles D1, D2 ou D3.....25
Figure 2.10	Défauts des chaussées flexibles – Défauts-familles D4 ou D526
Figure 3.1	Gonflement au gel - Effet du gel et du dégel sur une route29
Figure 3.2	Affaissement au gel - Effet du gel et du dégel sur une route30
Figure 3.3	Coupe type d'une chaussée rurale34
Figure 3.4	Processus de soulèvement par le gel dans les fondations granulaires37
Figure 3.5	Soulèvement du revêtement autour d'une structure non affectée par le gel38
Figure 3.6	Carte géologique du Québec40
Figure 3.7	Cause de détérioration des chaussées flexibles au Québec – Familles C1, C2 ou C351
Figure 3.8	Cause de détérioration des chaussées flexibles au Québec – Familles C4, C5 ou C6.....52

Figure 3.9	Organigramme des liens entre les familles de causes et de défauts	55
Figure 4.1	Étalonnage de nucléodensimètres sur une couche de pavage densifiée	69
Figure 4.2	Remorque Dynatest® 8000 Falling Weight Deflectometer	70
Figure 4.3	Carotteuse montée sur un camion de service	73
Figure 5.1	Organigramme du diagnostic d'une chaussée flexible par l'utilisation de l'outil.....	90
Figure 6.1	Photos n ^{os} 1 et 2 de la rue Lamothe, Blainville	102
Figure 6.2	Photos n ^{os} 5 et 6 de la rue Lucien-Paquette, Blainville.....	103
Figure 6.3	Photos n ^{os} 7 et 8 de la rue Lucien-Paquette, Blainville.....	104
Figure 6.4	Utilisation du tableau 3.3 pour le premier exemple de validation.....	106
Figure 6.5	Utilisation du tableau 3.3 (suite) pour le premier exemple de validation	107
Figure 6.6	Utilisation du tableau 4.3 pour le premier exemple de validation.....	108
Figure 6.7	Utilisation du tableau 4.3 (suite) pour le premier exemple de validation	109
Figure 6.8	Photos n ^{os} 1 à 4 du rang Lepage, Sainte-Anne-des-Plaines	113
Figure 6.9	Photos n ^{os} 5 et 8 du rang Lepage, Sainte-Anne-des-Plaines	114
Figure 6.10	Photos n ^{os} 17 à 20 du rang Lepage, Sainte-Anne-des-Plaines	115
Figure 6.11	Photos n ^{os} 25 à 28 du rang Lepage, Sainte-Anne-des-Plaines	116
Figure 6.12	Photos n ^{os} 37 à 40 du rang Lepage, Sainte-Anne-des-Plaines	117
Figure 6.13	Photos n ^{os} 41 à 44 du rang Lepage, Sainte-Anne-des-Plaines	118
Figure 6.14	Utilisation du tableau 3.3 pour le deuxième exemple de validation.....	120
Figure 6.15	Utilisation du tableau 3.3 (suite) pour le deuxième exemple de validation	121

Figure 6.16	Utilisation du tableau 4.3 pour le deuxième exemple de validation.....	122
Figure 6.17	Utilisation du tableau 4.3 (suite) pour le deuxième exemple de validation	123
Figure 6.18	Photos n ^{os} 1 à 4 de la 58 ^e Avenue, Montréal.....	127
Figure 6.19	Photos n ^{os} 5 et 8 de la 58 ^e Avenue, Montréal.....	128
Figure 6.20	Photos n ^{os} 13 à 16 de la 58 ^e Avenue, Montréal	129
Figure 6.21	Photos n ^{os} 21 à 24 de la 58 ^e Avenue, Montréal	130
Figure 6.22	Utilisation du tableau 3.3 pour le troisième exemple de validation	132
Figure 6.23	Utilisation du tableau 3.3 (suite) pour le troisième exemple de validation	133
Figure 6.24	Utilisation du tableau 4.3 pour le troisième exemple de validation	134
Figure 6.25	Utilisation du tableau 4.3 (suite) pour le troisième exemple de validation	135

INTRODUCTION

La période de la Révolution tranquille, vécue par les Québécois dans les années 1960, marque le début d'une période de croissance sans précédent de l'urbanisation du Québec. L'accroissement du nombre de kilomètres de routes a été soutenu durant les années 1970, 1980 et 1990. Un récent sondage mené auprès des 650 villes du Québec a confirmé que l'âge moyen du réseau routier municipal est d'une vingtaine d'années pour 80% des chaussées (Infrastructure Québec, 2003). Aussi, ce réseau routier est composé à 77% de structures flexibles, pavage sur fondation en matériaux granulaires, et n'a pas été revêtu depuis plus d'une dizaine d'années sur 90% de son étendue. Puisque nos infrastructures routières flexibles sont conçues pour une durée de vie utile de 15 à 20 ans (MTQ, 2005), le Québec devra investir massivement dans son réseau routier, durant les prochaines décennies, pour préserver sinon améliorer le niveau de service actuel. Le sondage a également révélé que l'état moyen des chaussées flexibles gérées par les municipalités québécoises est qualifié de passable à médiocre six fois sur dix (Infrastructure Québec, 2003), une proportion alarmante mais logique étant donné le constat exposé ci-dessus.

Les municipalités, qui ont répondu au sondage mené par Infrastructure Québec en 2003, prévoient utiliser 12 % de leur budget annuel total à la correction ou à l'amélioration de leurs infrastructures routières, ce qui représente une somme avoisinant les 15 millions de dollars pour une municipalité d'environ 100 000 habitants. Malgré des montants aussi importants, huit municipalités sur dix ne possèdent pas de système structuré leur permettant de maximiser le rendement des millions de dollars injectés dans leurs routes (Programme d'Infrastructure Québec, 2003). Il en résulte qu'en 2002, selon ce même sondage, la moitié des tronçons routiers réhabilités a été choisie en raison de l'état lamentable de la surface par rapport à l'ensemble des tronçons considérés. Également, la sélection finale d'une section de chaussée plutôt qu'une autre est dictée par le nombre de plaintes émises par les citoyens de la municipalité dans 30% des cas (Programme d'Infrastructure Québec, 2003). Les gestionnaires doivent connaître les raisons qui engendrent la dégradation de leur réseau afin de réaliser des travaux de réhabilitation ou de reconstruction efficaces et durables. Des systèmes de gestion d'infrastructures routières sont développés et mis en place dans

certaines municipalités québécoises depuis une douzaine d'années (Assaf, 2004). Ces derniers requièrent une connaissance détaillée du réseau afin que les rapports, générés à partir de modèles prescrits, assurent le niveau d'efficacité attendu par l'intervention proposée (Boucher, 1994). Avant l'implantation d'un tel système, les gestionnaires de réseau fondaient leurs choix d'interventions sur l'expertise de l'ingénieur routier, leurs connaissances globales du réseau et des tronçons jugés problématiques ainsi que sur l'appréciation qualitative du rendement sociopolitique d'un choix plutôt qu'un autre. Cette approche traditionnelle était l'unique méthode viable pour une municipalité, puisque l'utilisation des ordinateurs qui aurait permis son optimisation nécessitait des investissements abusifs pour un budget municipal.

Peu importe les moyens utilisés par les responsables des sommes investies, ces millions devront assurer un certain niveau de confort aux usagers de la route pendant une période de temps (Assaf, 2003). Pour arriver à cette fin, les investissements doivent être réalisés en fonction des problèmes responsables des défauts à corriger. Donc, les diverses sources de dégradations observées sur place doivent être connues. Les causes de la présence d'un défaut sont spécifiques au tronçon de route étudié puisque celui-ci possède ses caractéristiques propres. Étant donné que les dégradations évoluent dans le temps et dans l'espace, un gestionnaire de réseau doit prendre les dispositions nécessaires à la vérification périodique de l'état de chaque tronçon du réseau. La rigueur des mesures d'auscultation et de consignation assurera une qualité de relevés des défauts de surface et de l'uni, responsables de l'inconfort et de l'augmentation significative des coûts d'exploitation des véhicules, ainsi que le suivi de leur évolution dans le temps (Tessier, 1990). À ce jour, l'auscultation systématique et périodique n'est pas exécutée par les municipalités qui ne possèdent pas de système standardisé pour le relevé des dégradations, puisqu'elles ne sont pas en mesure de la mener ou de l'utiliser de façon efficiente. Certes au niveau projet, qui ne considère qu'une seule section de chaussée à la fois, les défauts sont relevés efficacement. L'information recueillie est méthodiquement analysée par l'ingénieur routier afin qu'il émette ses recommandations à l'égard des mesures à mettre en place. L'analyse alors réalisée est basée sur les principes enseignés académiquement (Assaf, 2004) ou selon

des modèles préétablis dans un système automatique, tel que ARC : « An Expert Inspection System for Road Repairs (Pehlivannidis, 1994) ». Évidemment, le rapport issu de la méthode préférée pour le diagnostic est présenté dans le but de spécifier la méthode de réhabilitation appropriée afin de corriger les causes des défauts observés sur les lieux.

Dans tous les cas, les routes se dégradent à cause du trafic et du climat. Les causes de ces dégradations sont identifiées dans la littérature, qui en dénombre une vingtaine pour les chaussées flexibles (Assaf, 2003). Malgré l'existence de quelques outils automatiques et structurés qui permettent d'associer directement une cause à un ensemble de défauts (Boucher, 1994), très peu sont efficacement utilisés et documentés au niveau municipal. Certes une mécanique rationnelle est enseignée dans le cadre de cours universitaires tel le cours CTN-710 donné à l'École de technologie supérieure, qui indique comment confirmer les causes responsables des dégradations observées. Il n'en demeure pas moins que les approches enseignées ne sont pas automatiques et invariables, puisqu'elles reposent sur les capacités de l'ingénieur routier à considérer plusieurs facteurs simultanément.

L'objectif de ce mémoire est de développer un outil structuré pour diagnostiquer les causes de détérioration d'une chaussée souple. Les paramètres considérés pour l'analyse sont : les dégradations de surface, les caractéristiques structurales, la nature du sol support et le trafic. L'outil permettra d'identifier les essais requis pour affirmer la présence et valider l'importance de chacune des causes dans la formation des défauts de surface relevés. Ce mémoire présente l'outil développé de façon à ce que l'utilisateur puisse intervenir, ou non, à chacune des étapes du processus d'analyse d'un tronçon étudié. Le procédé de l'outil proposé affirme la présence des causes en se basant sur l'analyse des résultats obtenus par l'exécution d'essais réalisés sur le site ou en laboratoire. Pour fins d'analyses, il est nécessaire d'exécuter les essais suggérés par l'outil pour parvenir à l'affirmation d'une cause. Cependant, l'option de réaliser ou pas un essai demeure sous la gouverne de l'analyste qui applique le procédé suggéré. Les causes affirmées sont ensuite validées auprès des défauts qui ont initialement conduit la mécanique de l'outil à suggérer les essais complétés. L'étape de validation assure la pertinence de la cause dans le processus qui a

engendré l'apparition du défaut de surface. Cette dernière étape est accomplie par l'analyste en appliquant les liens de causalité présentés dans une matrice synthèse développée dans ce travail. Celle-ci est destinée à ceci faire ressortir l'implication des causes affirmées dans l'évolution des mécanismes de détérioration qui ont conduit à l'apparition des défauts observés sur place.

La méthodologie appliquée pour l'élaboration de l'outil a débuté par une recherche bibliographique exhaustive afin de répertorier toutes les causes connues de détérioration des chaussées flexibles. De la même façon, une liste des défauts ou dégradations a été élaborée selon les termes les plus couramment appliqués aux irrégularités de surface rencontrées lors d'une campagne d'auscultation d'une structure de chaussée flexible. Généralement, la littérature traite du lien de causalité entre le défaut et la cause présente. De plus, elle tend globalement à faire la démonstration entre certains des éléments de chacun des deux domaines de recherche discutés ci-dessus. En raison d'une large panoplie d'articles traitant des causes et défauts des chaussées flexibles, il a été nécessaire de traiter globalement certaines particularités des éléments de ces deux domaines. Plus particulièrement, cette mesure a été utilisée en ce qui a trait à l'aspect de la sévérité des dégradations observées. Dans un troisième temps, la recherche s'est portée sur la grande diversité des essais en développement, homologués, disponibles et/ou couramment utilisés pour les chaussées souples. En effet, ceux-ci sont usuellement entrepris par les différents organismes publics et sociétés privées impliqués dans la gestion des réseaux composés, en majeure partie, de structures de chaussée flexible. À la suite d'un important effort de classification dans chacun des trois domaines de recherche, les causes, les défauts et les essais ont été répertoriés de sorte que les liens entre eux soient mis en évidence. Lors de l'élaboration de la méthode rationnelle de l'outil, les liens de cause à effet entre les dégradations et les causes probables ont été considérés invariables. Les informations recueillies sur les lieux du tronçon analysé sont traitées comme des intrants par le procédé systémique présenté afin de vérifier la présence, ou non, de ces liens invariables. Pour cela, la méthode d'utilisation prescrite dans ce travail permet à l'outil de préciser le type d'essai à compléter pour affirmer la présence, ou pas, des causes potentiellement responsables des défauts observés sur place.

Les quelque vingt causes et défauts prédéfinis dans la littérature, jumelés au grand nombre d'essais réalisables en laboratoire et sur site, engendrent un diagnostic multidimensionnel d'une complexité inquiétante pour quiconque n'est pas expert en matière de chaussée flexible.

Considérant cela, la complexité d'utilisation de l'outil a été réduite en rassemblant les éléments d'un même domaine de recherche selon certaines caractéristiques communes. De cette façon, la notion de « famille » a pu être utilisée dans le but de regrouper les causes, les défauts et les essais en sous-groupes dans chacun des trois domaines. Le regroupement par famille a été établi pour les causes en premier puisqu'elles arbitrent l'existence, ou non, du lien entre un défaut observé et un essai réalisable pour l'analyse. Par la suite, les familles de défauts ont été élaborées par analogie entre ceux qui soutenaient une corrélation avec des causes communes. En ce qui a trait aux essais, ils ont été rassemblés par groupe en fonction de leur type respectif. Notez que les essais ne sont pas regroupés en « famille ». Cette distinction est appliquée à l'ensemble du travail afin de souligner que les essais d'un même groupe ne se rattachent pas à des causes mutuelles. Ainsi, l'analyste peut aisément choisir un essai qu'il reconnaît plutôt qu'un autre tout en demeurant dans le même groupe. La liaison entre les familles de défauts et les familles de causes a été établie en conservant parallèlement chacun des liens invariables entre les défauts et les causes pour chacune des familles. Pour permettre l'utilisation des liens interfamilles, un schéma d'utilisation ainsi que la description de l'outil sont présentés au Chapitre 5 afin de fragmenter la méthode de fonctionnement de l'outil. Pour valider l'outil développé, des exemples détaillés d'utilisation et d'analyse y sont également présentés et décrits.

Un tel outil représenterait un intérêt pour toutes les municipalités afin de mieux asseoir le choix des interventions selon les causes de détérioration des chaussées. En effet, l'urgence de la situation décrite dans les premières lignes engendre le débat non moins important de justifier un type d'intervention plutôt qu'un autre, moins coûteux par exemple, pour une chaussée donnée. L'outil repose sur une mécanique rationnelle et impartiale pour l'affirmation des causes présentes. Grâce à l'analyse de plusieurs sections de chaussée, un

gestionnaire pourrait être en mesure de confronter des citoyens indignés par le manque d'action dans leur secteur. Il serait en mesure d'étayer les priorités de la municipalité par l'ajout d'arguments basés sur l'évolution connue des mécanismes de détérioration qui émanent des causes affirmées pour les tronçons concernés. Une des raisons pour lesquelles certaines interventions de réhabilitation n'ont pas assuré la durée de vie escomptée est que l'évaluation et le choix des travaux à réaliser reposaient sur l'interprétation du problème sous-jacent aux défauts observés. Effectivement, des organisations américaines ont constaté que plusieurs ingénieurs routiers concentraient leurs analyses du problème sur les défauts à corriger au lieu des causes de l'apparition de ces défauts (Cook & Seeds, 2004). Dans un tel cas, un gestionnaire de réseau pourrait se prémunir de l'outil présenté pour mieux comprendre les causes des défauts de surface avant de proposer l'intervention usuellement appliquée dans des cas similaires. Également, l'impartialité de la méthode combinée à une utilisation systématique pour toutes analyses réalisées par un gestionnaire permettraient à ce dernier d'enrayer la possibilité qu'un mauvais diagnostic soit en cause dans le cas d'une divergence d'opinion entre experts.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Revue de littérature

Ce chapitre, qui porte sur la recherche bibliographique, s'articule en particulier sur les éléments soulevés dans l'Introduction. Une importante proportion des écrits consultés pour la rédaction de ce chapitre est issue d'ouvrages spécialisés ou de revues scientifiques, tel le « Transportation Research Board ». Cependant, plusieurs références citées dans les recueils scientifiques spécialisés sont issues de régions géographiques qui ne représentent pas nécessairement les conditions propres à notre climat nordique, comme : l'Amérique du Sud, le Moyen-Orient, l'Afrique et même certaines parties de l'Asie. En contrepartie, les développements et l'avancement technologiques ainsi que les connaissances scientifiques appliquées ailleurs dans le monde peuvent nous éclairer pour mieux définir le comportement de nos chaussées au Québec. Par ailleurs, les ministères responsables de réseaux routiers gouvernementaux demeurent les principaux intervenants en matière de R&D dans le milieu de l'ingénierie routière. Le fait est que le développement économique d'une nation passe, entre autres, par l'état de ses routes (Assaf, 2004). L'entité responsable de la gestion de celles-ci se doit de mettre en œuvre des programmes qui assurent la pérennité des infrastructures afin qu'elles demeurent profitables à la société. D'autre part, le génie routier repose largement sur les connaissances apprises empiriquement nécessitant donc de nombreux sites d'essais et de grands investissements (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007). La complexité d'une structure de chaussée flexible est décuplée lorsqu'elle est analysée en profondeur. Comme le corps humain, l'enchevêtrement d'une multitude d'interactions entre les caractéristiques intrinsèques des éléments engendre l'abnégation de plusieurs entités quant à la compréhension de la détérioration d'une structure souple. Précisons qu'individuellement, le comportement évolutif des matériaux qui constituent la structure est très bien maîtrisé par les spécialistes de la discipline, mais les effets composés du trafic, du climat et du temps sur l'ensemble des

matériaux interagissant entre eux sont méconnus, à moins de procéder à un site d'essais. Cette réalité est due au fait que chaque tronçon se définit par son sol support, sa localité, les caractéristiques propres aux matériaux d'emprunt, ses matériaux de structure, le type de trafic, son âge, etc. (Assaf, 2003). Dans les faits, la recherche réalisée dans le cadre de ce mémoire nous conduit à déduire que les gestionnaires considèrent obsolète de chercher à extirper les innombrables possibilités qui entraînent la décrépitude d'une structure flexible, puisqu'à la base le but est d'éviter ce stade de dégradation. L'emprunt de cette tangente est observé dans les pôles de recherche qui influencent les communautés américaine et européenne en matière de gestion routière (Cook & Seeds, 2004). Par ailleurs, les associations parapubliques responsables de la recherche destinée à l'amélioration des réseaux n'ont que faire des raisons qui sous-tendent les défauts de surface, puisque l'essentiel de leur mandat est de rentabiliser les sommes investies (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007). Les importants ouvrages issus de la fin du siècle dernier, tels que ceux cités ci-après, pointaient déjà dans cette direction de recherche. La manne que représentait la croissance fulgurante des ordinateurs laissait présager des possibilités beaucoup plus attrayantes que la poursuite des recherches pointues sur les causes de détérioration des chaussées flexibles (Boucher, 1994).

En passant en revue la littérature dans le domaine de l'évaluation des chaussées flexibles, on constate rapidement que les ouvrages de référence académique (Tessier, 1990) ont concentré leurs efforts de compréhension dans trois secteurs plutôt distincts, soit : le relevé des dégradations, l'évaluation de la capacité portante et l'analyse de la durée de vie d'une structure. Une approche louable pour l'époque puisqu'elle repose sur les mêmes principes qui régissent la conception d'une structure flexible au niveau projet (Bruxelles, 2005). Contrairement aux croyances cultivées à ce moment, la gestion de l'immense quantité d'informations nécessaires à l'application de ces systèmes au niveau réseau demeure, à ce jour, difficilement réalisable pour une municipalité. Les sommes attendues pour la mise en place et l'opération efficiente de ce type de système ne sont tout simplement pas à la portée des organisations de petite ou moyenne envergure. D'autres sommités de cette période ont plutôt préconisé une approche basée sur les besoins des gestionnaires de réseaux routiers

(Haas & Hudson, 1994). Plus en phase avec les besoins des usagers de la route, l'ouvrage se concentre sur l'efficacité des interventions à réaliser au niveau projet en considérant la gestion globale d'un réseau routier. Dans ce cas, cibler les besoins et évaluer la durée de vie utile d'une structure routière sont des activités au cœur des principes présentés aux lecteurs. Cette vision de la gestion d'un réseau a suscité l'intérêt de plusieurs entités gouvernementales qui devaient se doter de systèmes pour gérer leurs milliers de kilomètres de chaussées (Boucher, 1994). Chez nous, le ministère des Transports du Québec a emboîté le pas en optant pour l'intégration de l'approche de classification en familles et de modélisation du comportement des chaussées du système A.G.I.R. (Auscultation et Gestion des Infrastructures Routières) (Assaf, 1987) à un système informatisé appelé à conseiller les analystes du réseau. Le développement a par la suite été dirigé dans le but de mieux concilier les diverses responsabilités gouvernementales, soit : connaître le réseau selon les caractéristiques des chaussées, évaluer l'état de toutes les sections, diagnostiquer les causes des détériorations relevées et prédire l'évolution de chacun des tronçons dans le but de prioriser les interventions (Pehlivanidis, 1994). La finalité de ces efforts s'est soldée par l'implantation d'un Système de Gestion des Chaussées (SGC) avant le début du nouveau millénaire. Depuis, le SGC est constamment amélioré avec de nouveaux outils technologiques en fonction des éclaircissements apportés par les résultats de nouvelles recherches (MTQ, 2006). Outre les publications de recherche générées par des organismes publics, la majeure partie des résultats de recherche privée sur le développement d'outils de gestion demeure soit confidentielle ou difficilement repérable en raison des propriétés intellectuelles qui s'y rattachent.

Les revues spécialisées traitent de tous les sujets qui touchent de près ou de loin au diagnostic des structures de chaussées souples, comme : l'auscultation des chaussées, les causes de détérioration, les essais réalisables et leur potentiel de vérification, etc. Toutefois, elles ne peuvent présenter les liens entre les différents articles puisque fournis par des auteurs différents. De plus, la vocation même de ces médiums est d'informer la communauté de la parution de l'ouvrage afin d'élargir les frontières de profitabilité des récentes découvertes (Assaf, 2003). En raison de la diversité des lecteurs qui tirent partie de

ces revues scientifiques, les textes sont volontairement exprimés sous une forme condensée afin de maximiser l'étendue des connaissances dans chaque parution. Permettant une approche plus pragmatique, d'autres sources d'informations sont disponibles de la part des fournisseurs de produits ou de matériaux par l'entremise de conférences comme celles organisées annuellement par le Centre d'Expertise et de Recherche en Infrastructures Urbaines (CERIU). Ces organismes sont une sorte de portail qui permet à toutes les organisations, gouvernementales ou privées, d'être informées des derniers résultats issus de réalisations ou de recherches réalisées dans le milieu des infrastructures municipales. Globalement, ces conférences présentent majoritairement les diverses possibilités qu'offrent de nouveaux types d'essais, de nouvelles méthodes d'interprétation des résultats, de nouveaux produits prometteurs ainsi que les enseignements profitables issus de résultats d'études ou de projets d'envergure (Cazavant, 2004). Par ailleurs, certaines alliances entre des entrepreneurs spécialistes en technique de réhabilitation et les municipalités, comme la Ville de Laval, contribuent aussi grandement à l'accroissement de nos connaissances sur l'évolution des méthodes disponibles pour la correction des structures souples ainsi que sur leur efficacité à long terme (Dessau-Soprin, 2003). Des recherches approfondies sur les causes de détérioration des chaussées souples démontrent qu'au 21^e siècle, le développement de logiciels utiles et pragmatiques représente la solution préconisée pour rentabiliser le budget d'entretien d'un réseau entier (Boucher, 1994). Objectivement, il est tout à fait impossible d'optimiser l'efficience des sommes nécessaires à la correction des défauts sur l'ensemble d'un réseau routier de milliers de kilomètres sans avoir recouru à un SGC (MTQ, 2006). Les innombrables possibilités engendrées par la diversité des caractéristiques de chacun des tronçons, ainsi que le nombre toujours grandissant d'options d'entretien réalisables, demandent une approche systémique pour en assurer l'analyse complète. L'étendue des possibilités offertes par les systèmes est impressionnante (Federal Highway Institute, 2006). Force est toutefois d'admettre que les modèles doivent être calibrés (St-Laurent, 2004) pour bien refléter la réalité des mécanismes de détérioration issus du climat québécois (MTQ, 2006).

Les cours offerts dans le cadre du programme de maîtrise en génie de la construction à l'École de technologie supérieure, enseignés par les professeurs Gabriel J. Assaf et Claude Bruxelles, ont efficacement démontré que les symptômes, ou défauts, étaient intimement liés aux causes qui engendrent les mécanismes de détérioration grâce aux agents, comme le trafic. Lors de la présentation des quelque vingt causes, les explications offertes dans le cadre de ces cours comprenaient également des précisions à l'égard des essais réalisables pour la validation des causes possibles (Assaf, 2004). Les notes de cours comprenaient des listes qui exposent les défauts, les causes et les essais pertinents aux structures souples. De plus, l'enseignement magistral permettait de développer sur la méthode d'analyse des mécanismes de détérioration. Enfin, la réalisation d'exercices préparatoires assurait l'assimilation de celle-ci par l'étudiant en génie routier (Assaf, 2004). Cependant, la recette n'assure pas le succès de l'analyse puisqu'elle ne présente pas de liens immuables entre les trois variables. En effet, la logique d'interprétation des défauts enseignés, qui fait office de loi d'orientation, doit être recommencée pour chaque tronçon évalué puisqu'aucune route ne présente exactement les mêmes caractéristiques au niveau projet. Le MTQ a utilisé l'outil de diagnostic ARC pour analyser chacun des tronçons, mais la priorisation des interventions ainsi que la nature de chacune d'elles dépassent largement le cadre de cette partie du SGC. En effet, pour finaliser les divers aspects de l'efficience du budget, tout un éventail de modèles de prédiction est compris à l'ensemble de leur SGC. Le Manuel d'Identification des Dégradations des Chaussées Souples (MTQ, 2002) est un bon exemple de la tendance de l'organisme vers la standardisation de ses relevés terrain. Toutefois, ce manuel présente diverses causes possibles pour chaque défaut et ne précise pas comment démystifier lesquelles engendrent la dégradation. Conséquemment, l'organisme gouvernemental préfère asseoir ses analyses, réalisées par de puissants logiciels, sur un diagnostic élaboré à partir des informations contenues dans ses bases de données (St-Laurent, 2004). Ces supers algorithmes permettent d'analyser l'ensemble du réseau pour choisir les meilleures interventions à exécuter sur chacun des tronçons routiers (MTQ, 2006). Certes, plusieurs systèmes de diagnostic utilisés actuellement assurent une rigoureuse analyse par tronçon, mais ils demeurent dépendants d'un système informatique complexe et nécessitent une implantation rigoureuse au niveau réseau (Boucher, 1994). Enfin, le SGC comprend l'aspect

diagnostique d'un tronçon, mais l'inextricable logiciel est indéchiffrable pour l'ingénieur municipal (Assaf, 2004). Dans le contexte d'une organisation de petite et moyenne envergure, l'indulgence des maîtres de fonds publics n'engendre pas l'attribution de sommes substantielles pour l'analyse des causes, puisque ce sont les résultats qui garantissent la croissance socioéconomique. Donc, une crevasse existe entre l'avancement technologique du SGC et le manque total d'approche systémique à laquelle certaines municipalités québécoises s'exposent par manque d'alternative. Dans ce contexte, une mécanique rationnelle, automatique, à l'échelle projet et compréhensible pour un professionnel compétent, serait une option bénéfique. Tel qu'introduit d'entrée de jeu, le présent outil a été développé dans le but de donner suite à ce besoin précis.

Avant d'élaborer sur le cheminement qui a mené au développement de l'outil, il convient de définir plusieurs termes qui seront largement utilisés dans le présent travail. Entre autres, l'ouvrage repose sur un grand nombre d'interactions entre les différentes composantes d'une structure de chaussée flexible. On considère que la structure de chaussée est composée d'éléments d'une construction formant un ensemble, entre lesquels il existe des relations qui sont dépendantes de leur disposition entre eux, de telle sorte que toute modification d'un élément ou d'une relation entraîne une modification des autres éléments ou relations. Aussi, les mécanismes de détérioration qui évoluent dans une structure de chaussée sont définis comme une suite d'événements physico-chimiques séparés qui engendrent un changement permanent des caractéristiques de la structure, de telle sorte que son « équilibre » est détruit et qu'à l'ultime, elle ne puisse plus remplir ses fonctions. Par contre, ils n'entreront en action que si la combinaison des agents présents dans la structure engendre la/les cause/s qui déclenche/nt le mode opératoire du mécanisme de détérioration. En ce qui concerne l'agent, nous considérons ce dernier comme une force, un corps ou une substance qui intervient dans un mécanisme de détérioration. La cause est l'acte, l'omission, l'événement ou toutes combinaisons de ces derniers qui conduisent, conditionnent et précèdent toujours l'apparition d'un défaut donné. L'information générale provenant de la littérature a été synthétisée afin d'en faciliter l'intégration dans l'outil proposé. Dans ce but précis, la notion de famille est largement exploitée dans cet ouvrage. La famille se définit

par un ensemble qui a son caractère ainsi que ses lois propres et qui regroupe des défauts ou des causes sur la base de critères communs. Puisque les causes ont été regroupées par familles et qu'elles représentent l'axe central autour duquel l'outil a été développé, le terme « cause-famille » a été élaboré afin d'accentuer la distinction à faire entre les causes incluses dans les causes-familles. Dans le même ordre d'idée, et pour éclaircir les explications au sujet des liens entre causes et défauts, le mot « défaut-famille » est ajouté au vocabulaire utilisé dans cet ouvrage. Les défauts observables dans, sur ou autour d'une structure de chaussée flexible sont des imperfections physiques, exception faite des fissures, décelables par la discontinuité des caractéristiques attendues de la surface d'une chaussée qui la rendent inacceptable selon les exigences minimales reconnues par les règles de l'art applicables. Les fissures, exclues de la définition exposée ci-dessus, sont fixées comme des fentes plus ou moins profondes dans un matériau, soit à l'intérieur de celui-ci, soit débouchant en surface, soit traversant toute l'épaisseur, le matériau étant complètement séparé entre les parois d'une fente. Les essais à réaliser pour confirmer la présence d'une cause sont un procédé d'évaluation qualitative, quantitative ou typologique des caractéristiques et des propriétés physico-chimiques d'un échantillon de matériel sans être sûr du résultat. Enfin, il est important de spécifier que le drainage d'une structure souple comprendra l'ensemble des dispositions ayant pour but la protection des ouvrages routiers contre les eaux de ruissellement et les eaux internes.

Donc, l'apparition de défauts à la surface d'un tronçon est due à la présence de certains agents qui agissent sur la structure de chaussée. Cet état engendre les causes qui déclenchent le mécanisme de détérioration produisant ainsi la dégradation de surface initialement relevée (Assaf, 1987). Ce processus évolutif est au cœur du diagnostic à prodiguer par l'utilisateur de l'outil présenté dans ces pages. L'action d'une cause permet d'affirmer la présence du mécanisme responsable de l'éruption des défauts (Assaf, 2003). Malgré l'exécution d'essais spécifiques à l'affirmation des causes, la diversité des résultats est accentuée en raison du caractère spécifique d'une structure souple et des changements internes en cours (St-Laurent, 2004). En effet, la perversion des résultats accroît l'incertitude de l'analyse cognitive et provoque le doute sur la véracité du diagnostic rendu

(Cook & Seeds, 2004). Pour contrer cette tendance, il est primordial de contre-vérifier l'affirmation de la cause par l'identification du lien de causalité entre les causes présentes et les défauts originellement ciblés par l'analyse (Assaf, 2003). Alors, le procédé systémique de l'outil doit comprendre : l'observation des défauts, l'analyse permettant de cibler les causes possibles, l'affirmation de la présence de chaque cause par la réalisation d'essais ainsi que la validation de ces dernières auprès des défauts qui ont conduit à leur réalisation en laboratoire ou sur site. Enfin, l'application du regroupement par famille entraîne une importante réduction du nombre de liens inductifs qui ciblent, affirment et valident les causes de détérioration à travers l'opération de l'outil. Le diagnostic du tronçon s'en trouve simplifié sans compromettre l'intégralité de la démarche. De surcroît, la synthèse des informations connues sur les défauts, les causes et les essais conduit à développer une mécanique d'utilisation qui assure la rigueur de l'analyse.

CHAPITRE 2

DÉFAUTS DE SURFACE D'UNE CHAUSSEE FLEXIBLE

2.1 Présentation des familles de défauts

Ce chapitre décrit les défauts de surface observés sur les chaussées flexibles dans le but de les classer conformément à une nomenclature compatible avec l'attribution des causes de détérioration développée au Chapitre 3.

Les défauts de surface d'une chaussée reflètent, en partie, l'état interne de la structure du tronçon analysé (MTQ, 2006). Tel que décrit précédemment, une famille de dégradations est constituée d'un regroupement de défauts. Pour faire partie d'un défaut-famille, tous doivent être engendrés par des causes qui agissent sur les mêmes éléments de la structure. Ces causes incarnent le lien avec les causes-familles potentiellement responsables des défauts relevés sur le site. Ces derniers ainsi regroupés par famille représentent donc des symptômes qui ont pris naissance grâce aux mécanismes de dégradation qui modifient certaines caractéristiques des éléments structuraux impliqués. Les familles de causes sont notamment regroupées en fonction de l'endroit duquel elles émanent dans la structure souple. Cette classification permet ainsi d'associer une dégradation à la spécificité de certains éléments de la structure, mais sa principale vertu est de faire ressortir le lien de causalité entre les défauts-familles présentés ci-dessous et leurs causes-familles associées.

2.1.1 D1 – Fissures transversales / mailles / carrelages

La première famille de défauts est exclusivement représentée par les fissures dites transversales et en mailles, ou carrelages. La fissure transversale se présente comme une ouverture perpendiculaire au sens du trafic (MTQ, 2002), souvent positionnée où la section transversale du pavage est plus courte, comme montré à la Figure 1. Celle-ci peut être causée par le retrait thermique du revêtement (MTQ, 2006), la remontée d'une fissure existante (Tessier, 1990), ou par un joint de construction mal exécuté situé sous la couche

de pavage observée. En ce qui concerne les fissures en mailles, elles se caractérisent par une multitude de petits polygones d'une superficie de moins de $0,9 \text{ m}^2$ (MTQ, 2002). Souvent, elles sont relevées sur les chaussées qui présentent une certaine fatigue du revêtement, ou bien une capacité portante insuffisante (MTQ, 2002). Enfin, l'oxydation et le vieillissement du pavage sont des causes qui augmentent la fragilité de l'enrobé bitumineux (Cook & Seeds, 2004). Le mélange ainsi fragilisé est moins résistant aux tensions internes du revêtement (Perraton, 2002) induites par l'évolution des mécanismes de détérioration qui sous-tendent les causes de formation des patrons de fissuration compris dans la famille D1 .

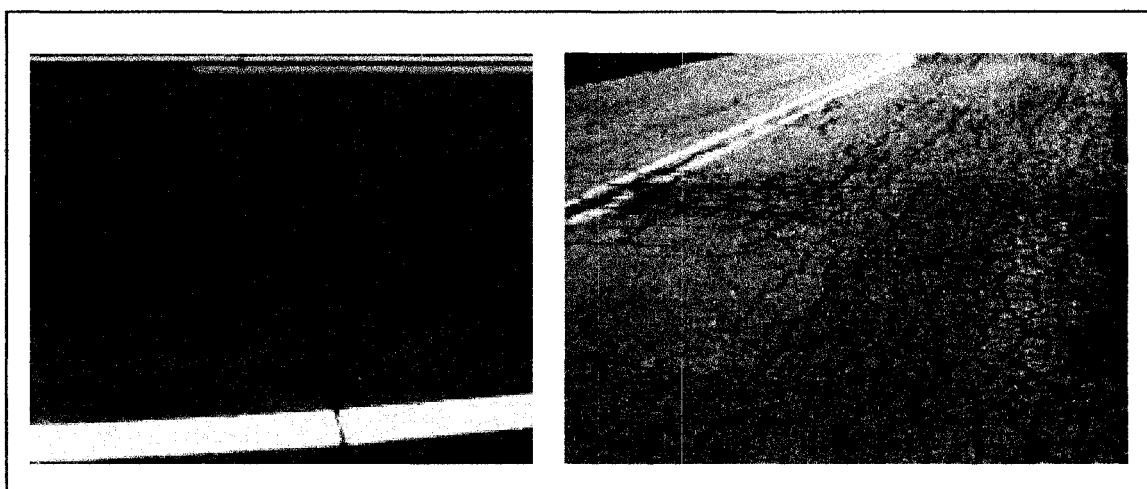


Figure 2.1 Fissures transversales à gauche et fissures en mailles à droite.
(MTQ, 2002)

2.1.2 D2 – Fissures longitudinales

Cette famille comprend toutes les fissures qui se présentent dans le sens du trafic, qu'elles soient rectilignes ou en lézarde. Cependant, il est primordial que la trajectoire globale de la fissure soit relevée à l'extérieur des pistes de roues des véhicules. Dans le cas contraire, le réseau de fissures sera classifié dans le défaut-famille D5, présenté ultérieurement dans ce chapitre. L'étendue du réseau de fissures considéré varie de la simple fissure à un ensemble de fentes globalement parallèles au sens de la circulation. Cet ensemble de défauts inclut également les fissures de gel et de rive. En résumé, toutes les fissures parallèles au trafic qui

ne sont pas situées dans les pistes de roues font partie de la famille D2. La fissure rectiligne, présentée à la Figure 2.2, correspond à un joint de construction mal exécuté (Assaf, 2003). Les causes associées à ce type de fissure peuvent également être dues à la ségrégation du mélange bitumineux lors de la pose et/ou au vieillissement, peut-être prématuré, du revêtement (MTQ, 2002). Les fissures de gel sont associées à un comportement gélif de la structure ou de l'infrastructure de la chaussée (MTQ, 2006). En ce qui concerne les fissures de rive, leur présence est attribuable à plusieurs causes spécifiques. Les plus répandues sont le manque de support latéral, la discontinuité de la structure, l'apport latéral en eau de ruissellement dans la structure de chaussée ou l'assèchement du sol support en milieu urbain (Cook & Seeds, 2004).

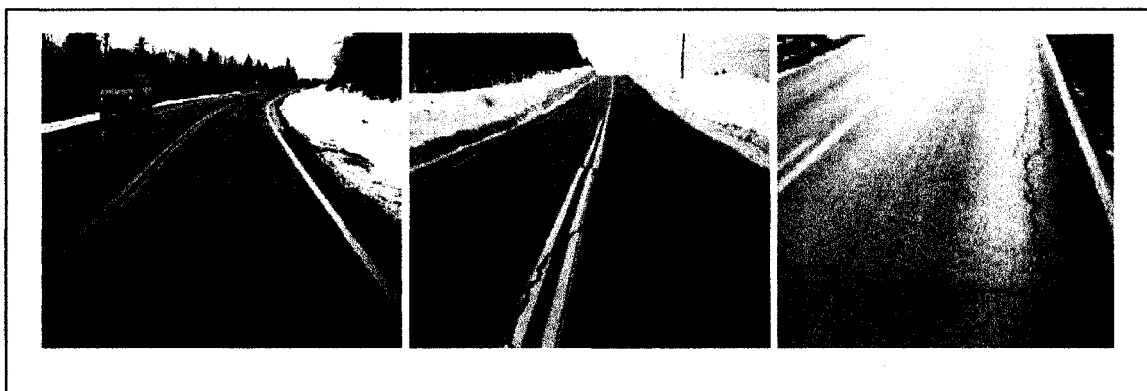


Figure 2.2 *Fissure longitudinale rectiligne à gauche, fissures de gel au centre et fissures de rive à droite. (MTQ, 2002)*

2.1.3 D3 – Défauts du revêtement

Ce défaut-famille comprend plusieurs dégradations de natures différentes comme : le désenrobage des granulats présents dans le mélange bitumineux, la pelade d'une couche d'enrobés, le ressuage de bitume vers la surface du tronçon et même les nids-de-poule (voir figures 2.3 et 2.4). En effet, la famille D3 constitue l'ensemble le plus varié dans la diversité de défauts regroupés. L'arrachement des granulats, ou désenrobage, est en majeure partie causé par un manque d'adhésion (Perraton, 2002), souvent conséquent avec le dosage et la nature du bitume et des granulats qui constituent l'enrobé bitumineux initialement mis en place (Bruxelles, 2005). Aussi, le vieillissement et l'oxydation du mélange le rendent plus

fragile (MTQ, 2006). Cette vulnérabilité peut engendrer l'arrachement des pierres concassées plus grossières et moins angulaires (Cook & Seeds, 2004). Aussi, elles peuvent être arrachées au passage des véhicules dans les pistes de roues, surtout dans les zones de freinage et de sollicitation accrue (Cook & Seeds, 2004). Dans le cas de la pelade, elle se présente comme une surface d'enrobés où il semble manquer une couche de revêtement (MTQ, 2002). Ce défaut est généralement engendré par une mauvaise adhérence entre les couches de revêtement (Asphalte Institute, 1987), par une épaisseur insuffisante de la couche de surface ou même par le passage très fréquent des véhicules lourds (Bruxelles, 2005).

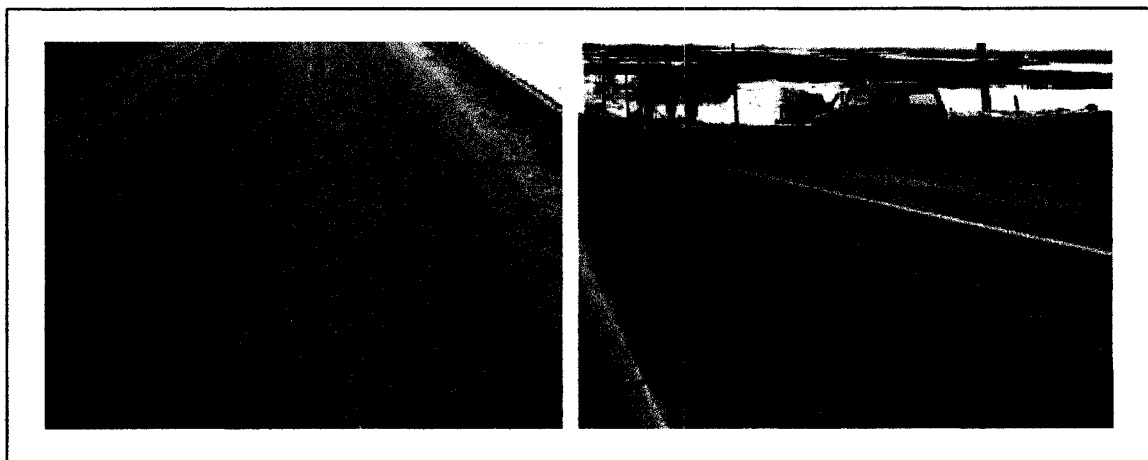


Figure 2.3 Désenrobage à gauche et pelade à droite. (MTQ, 2002)

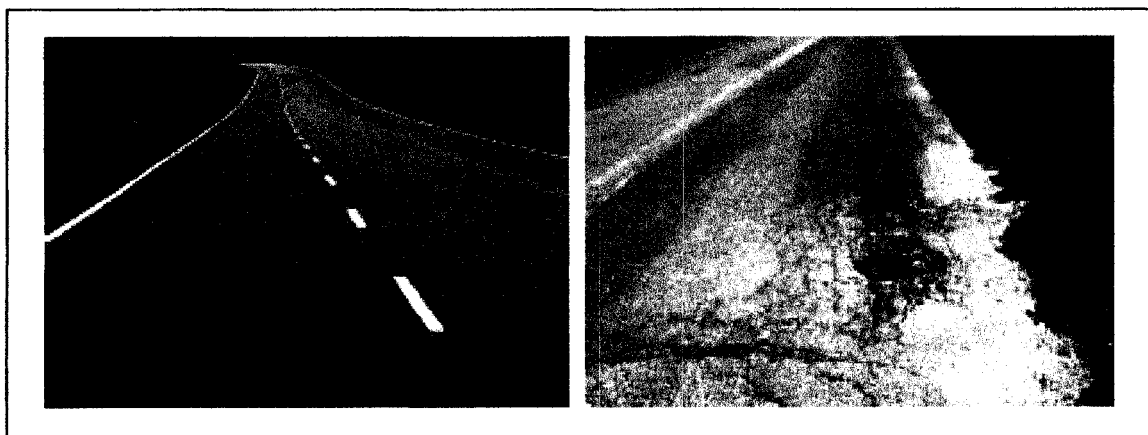


Figure 2.4 Ressuage à gauche et nids-de-poule à droite. (MTQ, 2002)

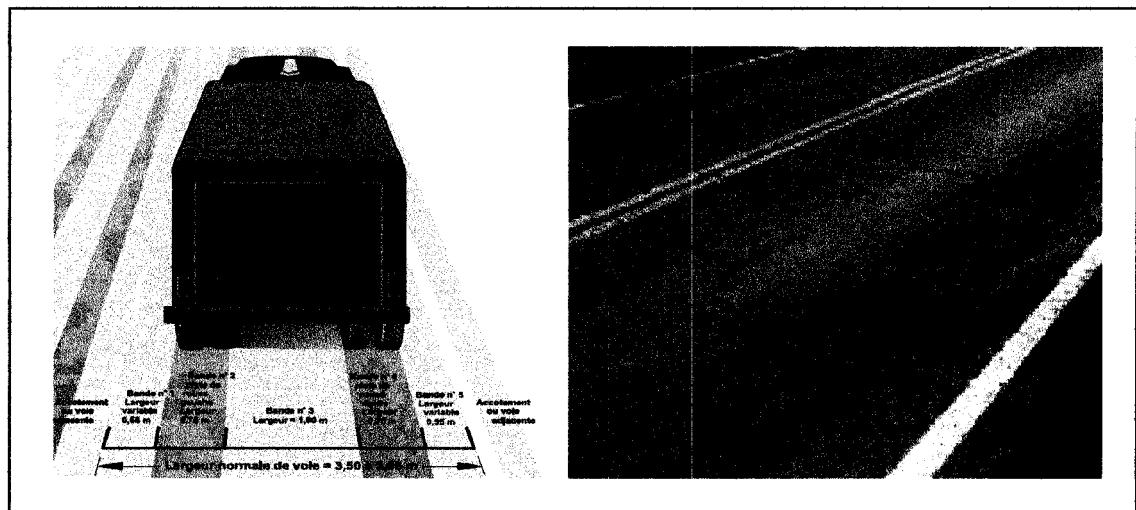
Le ressuage, présenté à la Figure 2.4, correspond à la remontée de l'excès de bitume emprisonné dans le mélange de l'enrobé bitumineux mis en place (Bruxelles, 2005). En effet, le surdosage de bitume et le manque de vide, ou les températures trop élevées pour le type de bitume, combinés au passage répété des véhicules (Cook & Seeds, 2004), ont pour effet de forcer le bitume excédentaire à remonter à la surface du tronçon (MTQ, 2002). Ce noircissement du revêtement, par la remontée du bitume, réduit l'adhérence entre les pneus radiaux sur la surface de la chaussée (Assaf, 2003). Enfin, ce symptôme peut être dû à un excès de liant d'accrochage lors de la pose ou à la formulation inadaptée du mélange aux conditions d'utilisation (MTQ, 2002).

Quant au nid-de-poule, il est malheureusement un fléau bien connu des Québécois. Il est décrit comme une : « Désagrégation localisée du revêtement sur toute son épaisseur formant des trous de forme généralement arrondie, au contour bien défini, de taille et de profondeur variables. Les trous peuvent être comblés par du rapiéçage temporaire (MTQ, 2002) ». Ils sont généralement dus à : 1) une faiblesse ponctuelle de la structure engendrée par un manque d'épaisseur du revêtement, souvent situé dans les pistes de roues des véhicules lourds (Bruxelles, 2005), ou 2) un taux d'humidité très élevé dans la couche granulaire, située directement sous la surface de l'enrobé alors que la température ambiante est plus élevée que le point de congélation (Ksaibati, 2000).

2.1.4 D4 – Défauts et fissuration dans les pistes de roues

Cette famille traite uniquement des défauts et de la fissuration du revêtement relevés sur la section de chaussée en contact avec les roues des véhicules, comme montré à la Figure 2.5. Ces symptômes sont très souvent liés à la fatigue du revêtement ou à un manque de capacité structurale de l'ensemble des couches de la chaussée (MTQ, 2002). Aussi, le mauvais drainage interne de la chaussée contribue à l'accroissement de la sévérité des dégradations dans les pistes de roues (Cook & Seeds, 2004). La position des défauts compris dans ce défaut-famille suppose que ceux-ci sont liés, de près ou de loin, au passage des véhicules. En effet, la structure des chaussées flexibles québécoises a une durée de vie limitée

puisqu'elle est érigée selon les besoins des usagers, en fonction de sa classe de route, au moment de sa construction (Bruxelles, 2005). Donc, la période de temps durant laquelle le tronçon remplit ses fonctions dépend de la quantité de trafic qui emprunte ce dernier (St-Laurent, 2004) durant une période de temps définie. Or, les chaussées qui ont été conçues et construites il y a vingt ans ont atteint leur durée de vie souhaitée puisque au-delà de cette plage de temps, le comportement d'une structure souple doit être réévalué (MTQ, 2006), mais qu'en est-il de leur durée de vie résiduelle? Cette dernière dépend de la quantité d'ECAS (équivalent de la masse de chargement d'un camion lourd sur un des essieux) qui est passée sur le tronçon depuis sa construction (St-Laurent, 2004). Concrètement, dans le cas où le nombre d'ECAS est plus élevé que la quantité prévue lors de la conception, la structure de chaussée présentera des signes de fatigue (Assaf, 2003). Une des preuves indiquant ce type de problème est la fissure dans les pistes de roues (MTQ, 2002); la famille D2.



**Figure 2.5 Position des roues lors du passage
d'un véhicule et fissures dans les pistes de roues. (MTQ, 2002)**

Les ornières à faible ou à grand rayon, illustrées à la Figure 2.6, représentent une importante partie des défauts de cette famille. Le polissage des granulats et les courtes ondulations perpendiculaires au sens du trafic, dégradations souvent observées dans les pistes de roues, sont également compris dans le défaut-famille D4. En ce qui concerne ces ornières à faible

rayon, elles sont souvent dues à l'instabilité d'un enrobé par temps chaud, à un mélange trop faible pour résister au trafic, à une compaction inadéquate de l'enrobé lors de la mise en place, ou à l'usure de la surface de l'enrobé (Cook & Seeds, 2004). Par ailleurs, cette dernière cause est également associée au polissage des granulats (MTQ, 2002). Dans ce cas, un problème de résistance à l'abrasion des granulats est possiblement issu de la nature de la pierre concassée utilisée (LCPC, 2006). En plus des causes énumérées ci-dessus, les ornières à grand rayon peuvent être causées par le vieillissement de la structure de la chaussée et à un mauvais drainage des matériaux granulaires dont cette dernière est constituée (Cook & Seeds, 2004). Il importe de préciser qu'une ornière à faible rayon est généralement caractérisée par une dépression, quelquefois double et triple, d'environ 250 mm de largeur (Bruxelles, 2005). Alors que l'ornière à grand rayon est généralement caractérisée par une dépression de forme parabolique évasée (MTQ, 2002). Enfin, les ondulations à onde courte, comprises dans cette famille, sont généralement observées dans les zones de sollicitation accrue par les véhicules lourds, comme les arrêts d'autobus et les intersections par exemple. Leur présence recèle la possibilité d'une mauvaise mise en place d'un mélange bitumineux insuffisamment stable pour les conditions d'utilisation (Bruxelles, 2005).

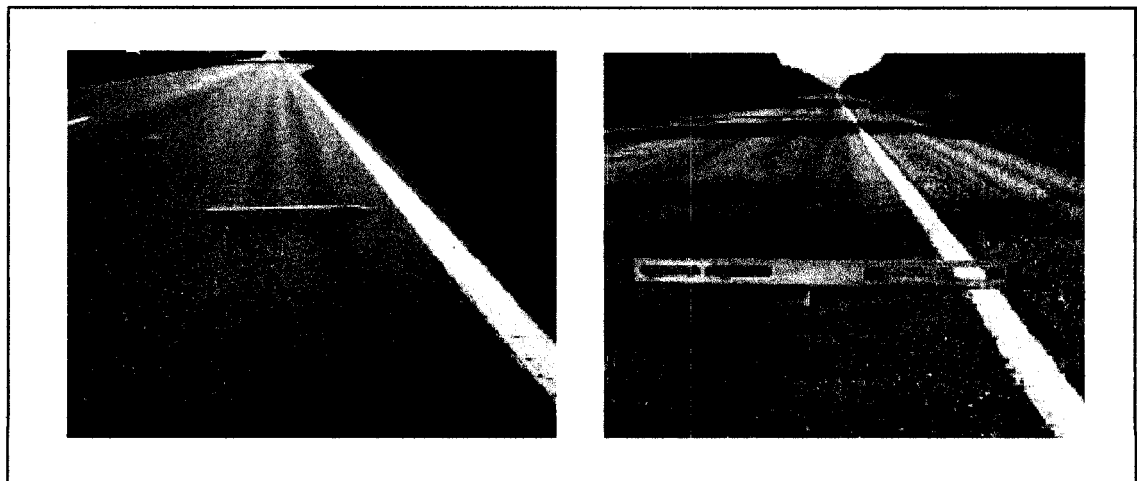


Figure 2.6 Ornières à faible rayon à gauche et à grand rayon à droite. (MTQ, 2002)

2.1.5 D5 – Désordre du profil

Le profil d'une chaussée est affecté par tous les défauts présentés dans les quatre autres défauts-familles (Assaf, 2003). Cependant, les défauts compris dans cette dernière famille se distinguent des autres en ce sens qu'ils représentent principalement un écart important avec le profil global de la chaussée, et ce, sans nécessairement présenter d'autres caractéristiques observables. C'est le cas des affaissements, de la présence d'eau à la surface, des bosses ou des soulèvements différentiels ainsi que les défauts autour des accès aux services souterrains. Les Figures 2.7 et 2.8 illustrent ces défauts typiquement relevés à la surface des chaussées souples. Les affaissements sont généralement causés par une structure inadéquate, qui engendre l'instabilité latérale ou structurale, ou bien par une déficience du drainage interne ou externe de la structure souple (Cook & Seeds, 2004). La mise en place de matériaux inadéquats ainsi qu'un manque de compaction des couches de la structure peuvent également engendrer l'affaissement du revêtement (MTQ, 2002). Dans le cas de l'affouillement ou de l'assèchement significatif du sol support, ceux-ci tendent à créer des secteurs affaissés par rapport au profil de l'ensemble de la structure d'une chaussée urbaine (Assaf, 2004). Les ondulations et soulèvement différentiel de la chaussée sont attribuables à l'effet récurrent des cycles de gel et de dégel sur les couches granulat et de sol support (ETS MGC-840, 2004) ainsi qu'au taux de particules fines élevées dans des matériaux de fondation saturés en eau (Côté, 1998). Ces bosses résultent également de la présence de matériaux hétérogènes sensibles à l'humidité dans la structure (Bruxelles, 2005). La succion de l'eau interne vers le sommet de la structure s'effectue par capillarité à travers les couches matériaux (Holtz, 1991). Le mécanisme s'alimente à partir de l'eau de la nappe phréatique qui pourrait être trop élevée dans la structure à cause d'une présence accrue aux abords de la chaussée (MTQ, 2002). Enfin, un profil accidenté peut aussi être causé par des transitions inadéquates entre les différents matériaux d'une même couche de la structure de chaussée (MTQ, 2002). Le désordre du profil n'est pas qu'une appellation qui désigne la famille D5, ce dernier comprend enfin un autre défaut, appelé points bas non drainés ou affaissements le long des bordures, qui correspond à des pentes et à une géométrie inappropriée de la surface qui favorisent l'accumulation d'eau à la surface des chaussées urbaines (MTQ, 2002).



Figure 2.7 *Affaissements à gauche et désordre du profil à droite. (MTQ, 2002)*

Les défauts qui entourent les accès aux structures souterraines ont été inclus dans cette dernière famille, puisqu'ils sont très similaires à d'autres défauts de la famille D5. En effet, un accès en mauvais état engendre fréquemment l'affouillement des matériaux de fondation situés autour de la cheminée, causant ainsi l'affaissement du pavage autour de la structure (Lemire, 2004). Les fissures autour des services, incluses dans la présente famille, découlent généralement de l'effet récurrent et différentiel des cycles de gel sur la structure de la chaussée par rapport à la cheminée de l'accès (MTQ, 2002). De plus, le mauvais état de la structure de la cheminée, les impacts dynamiques du trafic et la perte de matériaux autour de l'accès contribuent grandement à la formation des fissures radiales et des dénivellations autour de ces accès souterrains (Lemire, 2004).



Figure 2.8 *Fissuration autour d'un accès, dénivellation autour d'un accès et bosse ou soulèvement différentiel. (MTQ, 2002)*

2.2 Organigramme des familles de défauts

Les cinq défauts-familles présentés ont été établis afin de simplifier le nombre de liens entre les multiples défauts et les causes qui s'y rattachent.

Cette opération de synthèse a été conduite dans le but de ramifier l'analyse d'une chaussée flexible à quelques groupes de défauts généralement causés par certaines des six causes-familles présentées au Chapitre 3.

La synthèse des familles formées dans cette section est illustrée aux Figures 2.9 et 2.10. Celles-ci sont présentées sous forme d'organigramme pour permettre de lier visuellement un défaut observé au défaut-famille auquel il est intégré.

Figure 2.9 Défauts des chaussées flexibles – Défauts-familles D1, D2 ou D3.

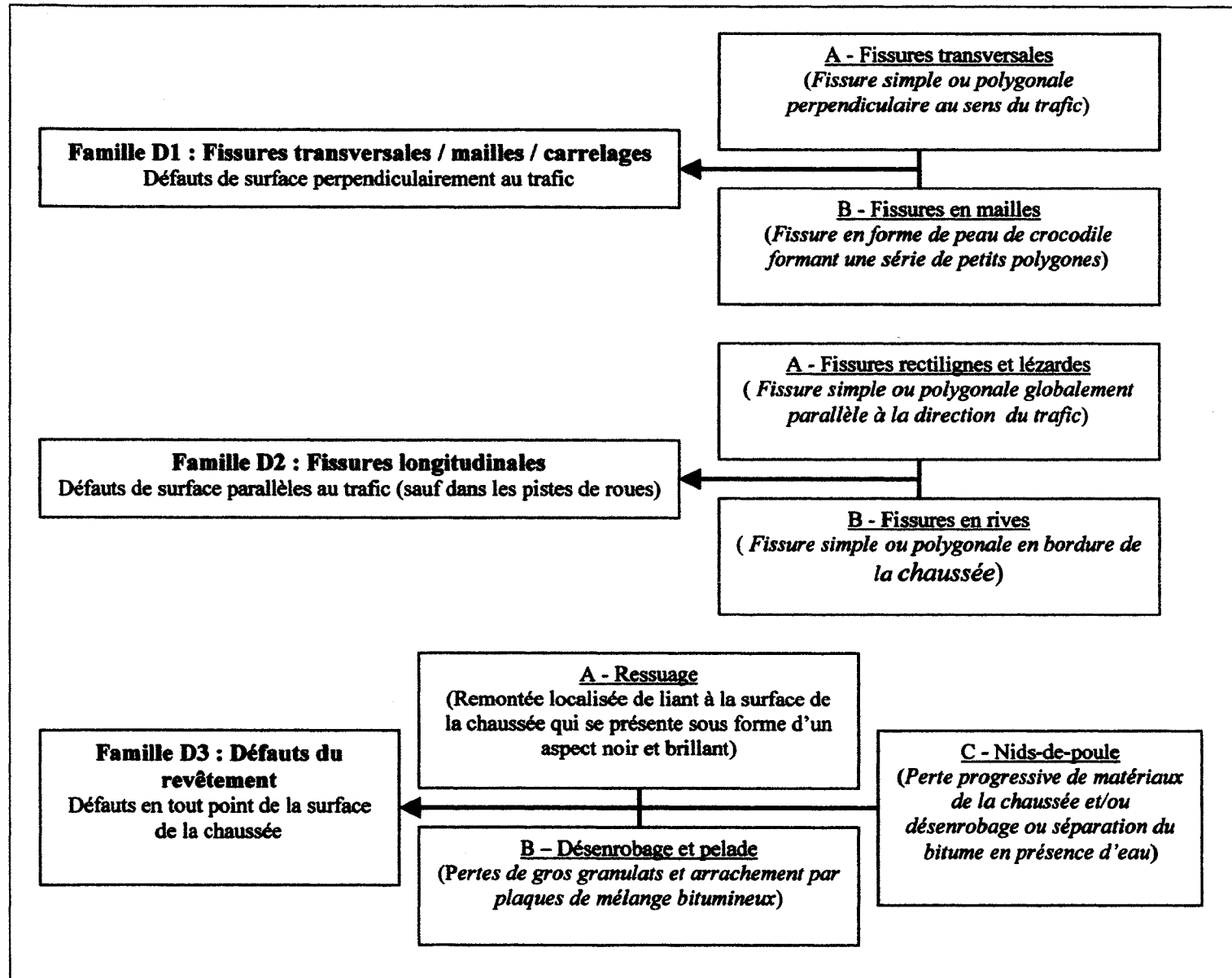
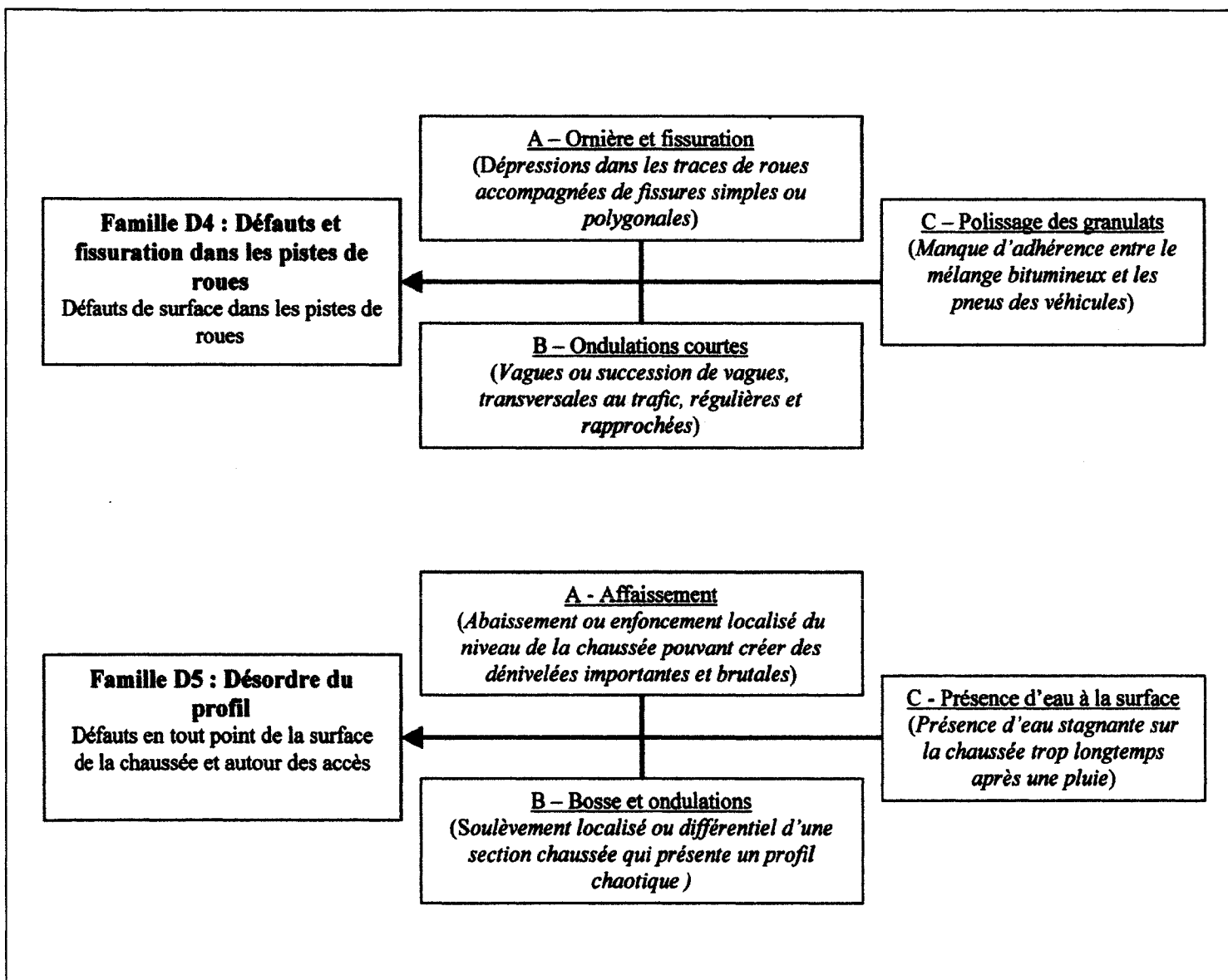


Figure 2.10 Défauts des chaussées flexibles – Défauts-familles D4 ou D5.



CHAPITRE 3

CAUSES DES DÉFAUTS D'UNE CHAUSSEE FLEXIBLE

3.1 Présentation des familles de causes

Les quelque vingt-sept causes de détérioration des chaussées flexibles repérées dans la littérature sont regroupées par famille dans ce chapitre et légitimées par des liens causaux présentés sous la forme d'une matrice synthèse. Tel que précisé préalablement, les causes sont regroupées selon leur champ d'action sur les composantes d'une structure de chaussée souple. Le chapitre portant sur la revue de littérature a établi le rôle de l'agent dans un mécanisme de détérioration. L'agent, déclencheur en somme, intervient dans une ou plusieurs parties de la structure et conditionne les modifications qui s'opèrent dans la structure. Suite à l'action de l'agent, le mécanisme de détérioration se développe pour modifier certaines caractéristiques de la couche affectée, et éventuellement des couches adjacentes, et engendre les causes sous-jacentes aux défauts de surface observés.

Ce chapitre justifie et élabore sur six familles de causes. Les nombreuses lectures, comme les articles du TRB et ceux de la Direction du Laboratoire des Chaussées (DLC) publiés par le MTQ sur le sujet, ont permis de mieux comprendre l'ensemble des causes qui engendrent les dégradations observées sur le réseau routier québécois.

Or, pour bien cadrer les causes problématiques, il importe de peindre un bref portrait des effets des conditions climatiques sur une structure souple typiquement utilisée pour la construction de nos routes.

Gilles Vigneault a écrit « Mon pays ce n'est pas un pays, c'est l'hiver ». Le vers introductif de la célèbre chanson « Mon Pays » traduit la rigueur des conditions qui sévissent au Québec et l'état du réseau routier québécois. Le Tableau 3.1 indique que le réseau provincial au Québec est presque aussi long que celui de l'état de New York, mais qu'il y a

environ le tiers des contribuables pour défrayer les frais d'entretien. Toujours selon cette même référence, la proportion linéaire de routes à entretenir pour un Québécois est plus de deux fois plus longue que celle d'un Ontarien. En plus, il fait froid plus longtemps au Québec. Conséquemment, la profondeur de gel est plus importante que chez nos voisins et nos routes en souffrent. Les précipitations plus importantes nécessitent des systèmes de drainage, interne et externe, mieux adaptés pour assurer un ruissellement de surface efficace, ceci dans le but d'évacuer les eaux des structures granulaires de la route. En effet, une augmentation de 1% du taux d'humidité dans une couche granulaire peut engendrer, selon la nature des constituants, une chute de la résistance de cette dernière de l'ordre de 30 %, soit le tiers de la capacité portante obtenue avec une teneur en eau optimale (Ksaibati, 2000).

Tableau 3.1
Comparaison des réseaux routiers gérés par l'État
(MTQ, 2005)

	Québec	Ontario	New York	France
	29 000	75 000	30 500	37 650
Nombre d'habitants (millions)	7,5	12,5	19	61,4
Précipitation annuelle moyenne (mm)	1 000	800	750	800
Durée du gel (jour/an)	147 à 215	90 à 160	10 à 100	0 à 90
	1,2 à 3	0,5 à 1	moins de 1,4	0 à 0,5

De façon très générale, il y a deux facteurs qui dégradent les routes : les conditions climatiques et le trafic. Toutes les autres causes de détérioration sont issues de ces deux catégories. La période hivernale, forte de ses 220 jours de gel par année, engendre la pénétration du gel à plus de 2,0 mètres. Étant donné que le déneigement est réalisé sur la surface de la chaussée, le gel pénètre en profondeur sous cette dernière par manque d'isolation du manteau de neige (Bruxelles, 2005). Comme l'illustre la Figure 3.1, la ligne

du front de gel s'élève en se rapprochant progressivement des côtés de la structure, puisque la neige agit comme isolant. Le bassin de gel accentue la formation de lentilles de glace dans les couches inférieures. Ce phénomène, quoique plus souvent observé dans les chaussées qui reposent sur un sol support gélif comme l'argile (MTQ, 2005), accentue le gonflement de la chaussée. Inévitablement, le revêtement doit se fissurer dans le sens du trafic pour compenser cette augmentation du volume de l'ensemble de la structure flexible. Le cycle de gel terminé, le dégel des couches sera enclenché dès la deuxième semaine du mois de mars et s'étendra dans le temps jusqu'à la mi-mai de chaque année.

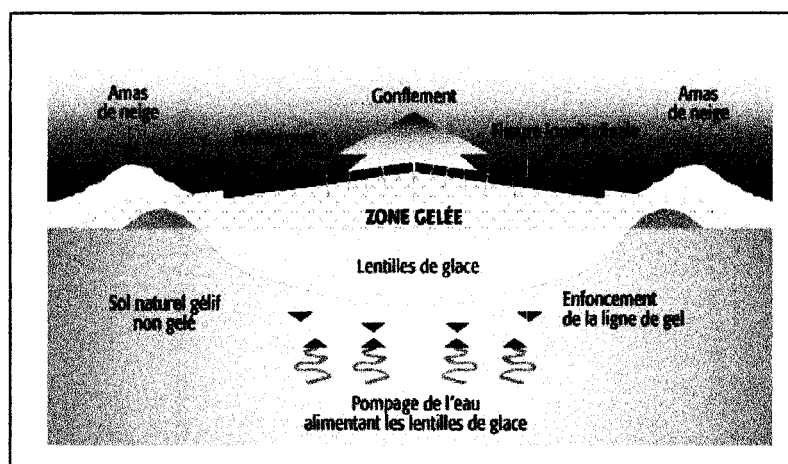


Figure 3.1 Gonflement au gel – Effets du gel et du dégel sur une route. (MTQ, 2005)

Cette période de l'année est caractérisée par des températures plus clémentes, mais surtout par le dégel des couches de surface en premier. L'eau, emprisonnée sous forme d'humidité, se transforme en lentille de glace ou de saumure dans les premiers centimètres de la structure (Tessier, 1990) et se libère pendant le dégel à travers les couches granulaires sous-jacentes. Cependant, l'eau ne pouvant être évacuée à travers les couches encore gelées, le niveau d'humidité s'accroît dans la structure réduisant ainsi la capacité de la route à supporter les charges répétitives des véhicules lourds, tel que montré à la figure 3.2 (DLC, 2003).

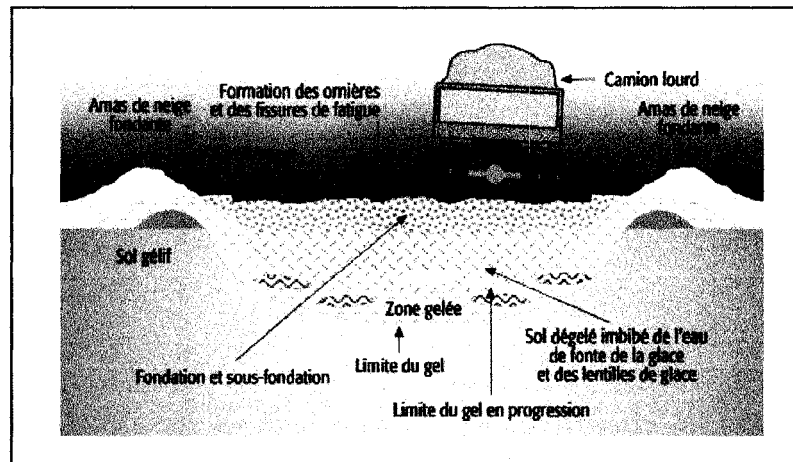


Figure 3.2 Affaissement au dégel – Effets du gel et du dégel sur une route. (MTQ, 2005)

La capacité portante d'une structure souple peut ainsi être massivement réduite par rapport à sa capacité portante observée en période estivale (St-Laurent, 2004). Cette perte de portance oblige les gestionnaires de réseaux à imposer des limites de chargement aux véhicules lourds durant cette période de plus ou moins huit semaines (MTQ, 2005). Le mouvement vertical provoqué par le gel de l'eau interstitielle ne se résorbe pas totalement après le dégel printanier (Holtz, 1991). En effet, les structures formées de matériaux granulaires permettent un certain déplacement interne des granulats. L'effet de ces cycles, imposé répétitivement et plusieurs fois par année, engendre un déplacement permanent des constituants granulaires, et donc, un certain désordre du profil initialement construit (Holtz, 1991). Ces déformations se répercutent sur le revêtement (Tessier, 1990), d'où la formation de certains défauts de surface discutés au chapitre précédent. Enfin, ces défauts contribuent à l'accroissement du nombre de points de faiblesse de la chaussée et engendrent une accélération de la dégradation générale du tronçon par l'effet récurrent des cycles de gel et dégel (Assaf, 2003).

Toutes les routes se dégradent grâce au trafic et aux conditions climatiques. La structure se détériore, plus ou moins rapidement, selon la gravité des causes en présence dans les diverses couches de l'ossature. Ce principe de base dépend des caractéristiques de la chaussée analysée puisque pour une même cause, l'impact de celle-ci est tributaire du

matériel dans lequel elle agit (Holtz, 1991). Donc, les propriétés d'une chaussée à construire seront ciblées avant sa construction pour qu'elles soient adaptées à l'environnement physique dans lequel le tronçon vieillira (Bruxelles, 2005). Ces précautions sont prises dans le but d'observer une durée de vie utile qui tend vers celle projetée lors de la conception de la route.

Or, l'environnement est très variable, la nature du sol support, la profondeur moyenne du gel dans la région, le type de trafic à supporter, le milieu urbain ou rural, l'élévation des eaux souterraines, la géométrie du terrain naturel, etc. Tous ces facteurs influencent le choix des constituants incorporés dans les couches de la structure (Assaf, 2004). Donc, une route déployée sur plusieurs kilomètres carrés présentera très certainement une composition structurale différente d'un endroit à un autre. De la même façon, les différences de composition sont d'autant plus accentuées lorsque l'on compare deux tronçons distincts (Assaf, 2004).

En contrepartie, les caractéristiques d'une structure de chaussée souple sont, globalement, très semblables (Assaf, 2004). Pour permettre à un outil de considérer tous les types de sections de chaussées souples analysées, les bases de regroupement des causes devront s'articuler sur la composition générale d'une structure typique. C'est le mode opératoire qui assure l'intégration de différents types de structures flexibles. Comme précisé au Chapitre 1, les causes sont le maillon entre les défauts relevés et les essais à réaliser. Cette ligne de pensée préconise donc la formation de familles de causes qui, à la fois, assure les liens avec les défauts-familles et les essais qui permettront d'affirmer si les causes sont présentes.

3.1.1 C1 – Enrobés bitumineux

La première famille de causes rassemble toutes celles qui émanent des caractéristiques de l'enrobé bitumineux en place lors de l'analyse du tronçon routier à diagnostiquer.

La présence de ces causes peut être due à :

- ✓ une formulation inadéquate du mélange bitumineux;
- ✓ l'utilisation de matériaux incompatibles;
- ✓ un vieillissement qui a conduit à la fragilisation du bitume;
- ✓ une carence de capacité portante des couches de pavage (MTQ, 2002).

Certaines causes sont liées à plusieurs de ces problèmes. Les matériaux incorporés lors de la préparation du mélange bitumineux lui confèrent ses propriétés. En effet, le type de bitume assure la résistance au retrait thermique du revêtement observée durant la saison hivernale (DLC, 2004) ainsi que l'adhérence entre les couches d'enrobés par le biais du bitume d'amorçage utilisé lors de la mise en place des épaisseurs de pavage (Cook & Seeds, 2004). Le liant contribue également à la stabilité du mélange par temps chaud, à la résistance d'arrachement des granulats ainsi qu'à la fatigue (Perraton, 2003).

Le type de granulats liés par le bitume est un facteur déterminant du comportement de l'enrobé. Par exemple, l'utilisation d'agregats hydrophiles ou bitumophobes peut engendrer des problèmes d'adhérence entre ces derniers et le bitume (MTQ, 2002). Ceci tend à accroître les chances de décollement du liant sur la couche sous-jacente (Asphalte Institute, 1987). Des granulats trop friables sont souvent la cause des problèmes d'usure prématurée du revêtement dans les traces de roue (Cook & Seeds, 2004). En ce qui a trait à la formulation du mélange, le surdosage ou sous-dosage de bitume d'un mélange donné contribue à certaines des causes déjà présentées dans la cause-famille C1 (Assaf, 1987).

Enfin, l'exposition au rayon du soleil oxyde le bitume présent dans le revêtement (MTQ, 2006). Entre autres raisons, le vieillissement du pavage d'une route s'effectue par le phénomène d'oxydation, ce qui réduit les propriétés viscoélastiques de l'enrobé (Perraton, 2003). Par cette évolution, il est plus susceptible de se fissurer sous l'effet des contraintes provenant du retrait thermique du mélange puisqu'il est plus rigide (Assaf, 2003). En effet, la surface exposée d'un mélange bitumineux tend à se contracter sous l'effet de

l'abaissement de la température. Ce phénomène engendre des contraintes internes dans le revêtement qui, ultimement, le font fissurer dans le sens de la largeur (MTQ, 2006).

Enfin, le sous-dimensionnement de l'épaisseur totale du revêtement engendre une déficience de la portance (Bruxelles, 2005) qui se traduit par un bassin de déflexion plus prononcé lors du passage de véhicules lourds (St-Laurent, 2004). Les routes érigées il y a plus de 20 ans ne sont pas en mesure de fournir la portance nécessaire à l'accroissement du trafic et des charges induites par les nouvelles générations de camions lourds (De Beer, 2006).

3.1.2 C2 – Structure de chaussée

La présente cause-famille comprend les causes qui agissent sur les propriétés des couches granulaires d'une chaussée flexible. Également, il est précisé que les matériaux de la sous-fondation, la fondation inférieure et supérieure ainsi que l'accotement (plutôt utilisé dans les milieux ruraux) sont considérés comme un ensemble indissociable nommé « Structure de chaussée ».

La figure 3.3 illustre les couches de matériaux granulaires typiquement mises en place pour constituer une structure dite souple. Ces couches granulaires sont principalement destinées à remplir deux fonctions. La première est de répartir la charge induite par un véhicule à travers les diverses couches granulaires (Bruxelles, 2005). Dans le cas d'un chargement lourd, l'étalement d'un équivalent de charge axiale simple (É.C.A.S.) est essentiel puisqu'une majorité des sols naturels ne possède pas la portance nécessaire au support de la charge induite par le revêtement bitumineux (MTQ, 2006). La deuxième fonction des couches granulaires est d'assurer le drainage interne de l'ensemble structural puisqu'elles présentent une meilleure perméabilité que le sol support de la route (Tessier, 1990). En effet, les matériaux non tamisés présentent généralement des particules plutôt homogènes et fines, ou bien hétérogènes et moins perméables qu'une couche de matériel concassé selon

une granulométrie dite étalée (Holtz, 1991). Les capacités de drainage de la structure sont primordiales pour minimiser son taux d'humidité ainsi que les effets du front de gel sur le gonflement du profil longitudinal de la chaussée (Boutonnet, 2003).

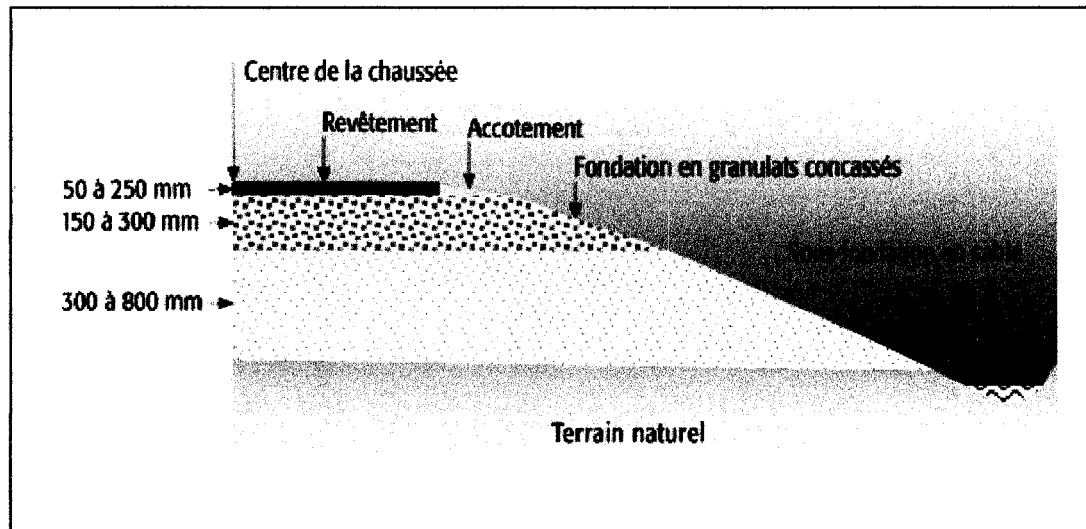


Figure 3.3 Coupe type d'une chaussée rurale. (MTQ, 2005)

Les causes qui sous-tendent l'apparition de défauts peuvent être dues à :

- ✓ l'hétérogénéité des matériaux d'une même couche;
- ✓ une déficience en drainage;
- ✓ un manque d'épaisseur de l'ensemble structural;
- ✓ l'usure des matériaux qui engendre la fatigue structurale de l'ensemble des couches (MTQ, 2002).

Dans son état initial, chacune des couches de la structure de chaussée devrait présenter une granulométrie étalée de particules de même nature, tel que normalisé dans la littérature (Recueil des Méthodes d'essai LC, 2005). Les comportements différentiels observés en période hivernale sont causés, entre autres raisons, par une hétérogénéité des matériaux qui constituent une même couche granulaire. Cette irrégularité des matériaux résulte très

souvent d'une construction à phases multiples. Dans certains cas, les étapes d'exécution des travaux engendrent d'importantes différences concernant la juxtaposition des couches structurales (MTQ, 2002). Le profil accidenté créé par les mouvements différentiels est fortement amplifié par la présence d'eau gelée dans la structure en période hivernale (Tessier, 1991). La formation de lentilles de gel dans les matériaux granulaires est globalement due à une carence en drainage interne des couches structurales. Le volume de gel interne est décuplé par un apport en eau additionnelle dont les ressources proviennent de la nappe présente à la base des couches de l'ossature (MTQ, 2006). En effet, une déficience du système de drainage externe engendre une certaine remontée du niveau de l'aquifère souterraine, agissant ainsi comme catalyseur à l'effet capillaire de la remontée d'eau dans les couches de matériaux granulaires (MTQ, 2006).

En ce qui concerne la capacité portante de l'ensemble structural, elle doit subvenir aux charges induites par le trafic durant toute la période de vie utile désirée lors de la conception du tronçon (Bruxelles, 2005). L'accroissement marqué du trafic sur les routes canadiennes durant les 30 dernières années a engendré une importante croissance du trafic québécois (Statistique Canada, 2006). Une augmentation que les concepteurs n'ont pas nécessairement anticipée et retenue lors de l'application des normes de construction des années 80. L'usure des granulats qui constituent l'ensemble granulaire est aussi une cause de détérioration de nos chaussées (MTQ, 2002). En effet, sous le passage de milliers de camions lourds, le revêtement transmet répétitivement les charges à la couche granulaire sous-jacente. Celle-ci diffuse la charge non absorbée à la couche inférieure de la structure de chaussée. La propagation des contraintes induites sur les granulats de la structure tend à briser l'angularité de ces derniers (St-Laurent, 2004), ce qui diminue la surface de contact entre eux (Tessier, 1990) et engendre la fatigue structurale de la route (MTQ, 2006). Enfin, la consolidation et le tassement des matériaux granulaires engendrent des dépressions dans le profil de la chaussée (MTQ, 2002). Ils peuvent être dus à plusieurs facteurs internes, comme des points de faiblesse locaux causés par un fort taux d'humidité (Assaf, 2004), ou externes à la structure de chaussée et reliés à l'environnement général (Assaf, 2003).

3.1.3 C3 – Drainage

Une route doit posséder des caractéristiques qui assurent un drainage adéquat pour qu'elle préserve sa durée de vie utile (Tessier, 1990). En cas de lacune, les défauts discutés au chapitre précédent sont très souvent aggravés, ce qui accélère la détérioration générale de la chaussée (Assaf, 2004). En fonction de la teneur en eau contenue dans les couches granulaires, la présence d'eau accentue sensiblement l'influence des causes précisées et incluses à la cause-famille C2 (Tessier, 1990).

La présence des causes relevant de cette cause-famille peut être due à une déficience :

- ✓ du drainage interne de la structure chaussée;
- ✓ des systèmes de drainage externe;
- ✓ du drainage de surface de la route (MTQ, 2002).

Le drainage interne assure l'écoulement de l'eau vers le fond des couches de la structure (MTQ, 2002). Les infrastructures aménagées autour ou en dessous de la structure permettent de contrôler l'apport en eau provenant de l'extérieur ainsi que la pression d'entrée d'air qui influence le degré de saturation des matériaux constituant la structure de chaussée (MTQ, 2006).

Dans les environnements urbains, les cours d'eau formés par la rencontre du pavage et de la bordure assurent le drainage des eaux de ruissellement vers un point bas qui permet le rejet de cette eau vers un système de captage (Bruxelles, 2005). Une accumulation d'eau à la surface est souvent causée par un manque de support latéral des matériaux granulaires (Assaf, 2003). En effet, la flaque d'eau observée est due au déplacement des granulats vers l'extérieur de la structure, ce qui engendre une dépression au niveau du cours d'eau, dégrade le profil et empêche l'eau de s'écouler jusqu'à l'exutoire prévu.

La fissuration de surface d'un enrobé offre l'opportunité à l'eau de ruissellement de s'y infiltrer, augmentant ainsi la quantité d'eau à drainer par la couche granulaire. En effet, l'eau captée par l'ouverture de la fissure s'engouffre dans la couche située directement sous le point d'entrée d'eau (MTQ, 2006). Les observations du MTQ démontrent que la surface de fondation granulaire affectée par ce type d'infiltration est très souvent confinée à moins d'un mètre carré. Plus particulièrement lors des périodes transitoires des cycles de gel et dégel, cet apport en eau est emprisonné entre la couche d'enrobé et les matériaux granulaires toujours gelés à cette période, ce qui augmente significativement le taux d'humidité ponctuel (MTQ, 2006). De plus, le sel de déglacage dilué par l'eau de ruissellement crée une saumure. Lorsque la température de gel de l'eau est à nouveau atteinte, la très forte concentration de sel dans l'eau augmente significativement la variation de volume de l'eau, tel que présenté à la Figure 3.4.

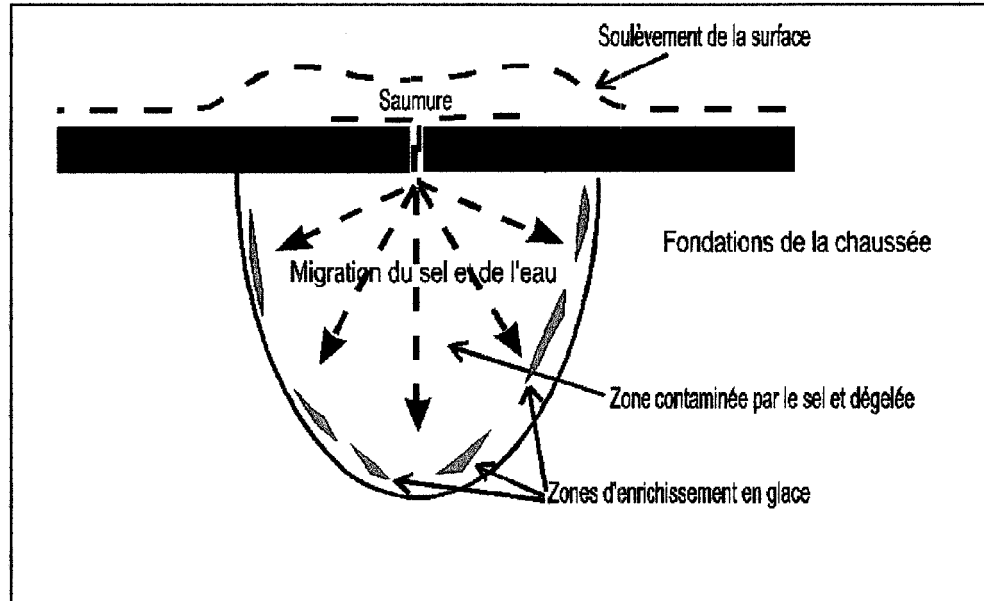


Figure 3.4 *Processus de soulèvement par le gel dans les fondations granulaires.*
(MTQ, 2005)

Dans ce cas, la fissure est en cause puisque l'infiltration d'eau est possible grâce à l'ouverture dans le revêtement. Afin de clarifier le vocabulaire technique utilisé dans ce travail, cette cause sera adressée comme un mauvais drainage de surface et est incluse dans la cause-famille C3. Tel que précisé, une importante baisse de résistance d'une couche granulaire est fréquemment causée par un taux d'humidité élevé à l'intérieur de la couche étudiée. Les ornières, les nids-de-poule ainsi que d'autres défauts de surface seront sensiblement aggravés par ce mécanisme de détérioration, surtout si cet accroissement se crée directement sous l'enrobé (Assaf, 2004).

Lorsque l'ensemble granulaire présente de mauvaises caractéristiques de drainage interne, causées par un pourcentage de particules fines trop élevé (Recueil des Méthodes d'essai LC, 2005), le gonflement de la chaussée est accentué sur toute la largeur exposée au gel et sur toute la longueur de la section de route concernée (MTQ, 2002). On remarque souvent ce type de problème par une différence marquée entre l'élévation du couvercle d'un accès aux structures souterraines et le pavage situé autour de la structure, comme illustré ci-dessous.

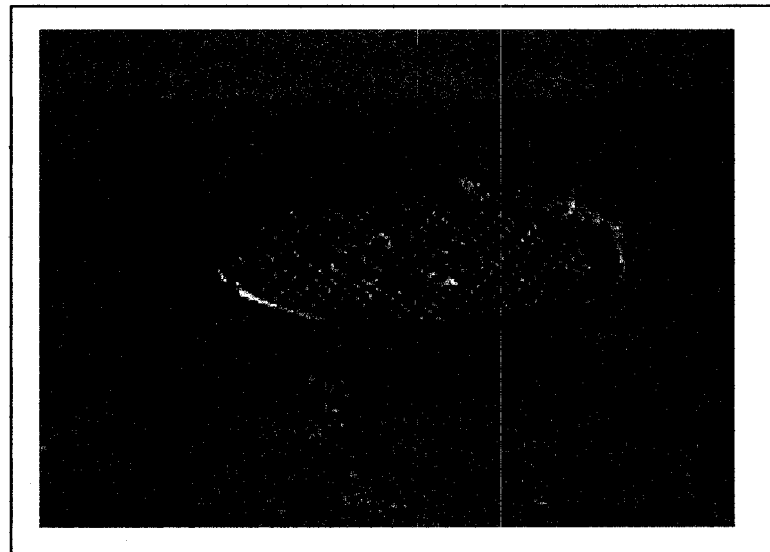


Figure 3.5 *Soulèvement du revêtement autour d'une structure non affectée par le gel.*

(MTQ, 2002)

Les routes rurales sont munies de fossés et de tranchées drainantes dans le but, entre autres, d'éloigner le plus rapidement possible l'eau contenue dans les couches de la structure (DLC, 1999). Il est démontré que dans un milieu confiné en humidité, signifiant que le taux d'humidité des sols environnants et de support est plus près du niveau de saturation que celui des matériaux granulaires, la capillarité des matériaux granulaires engendre la remontée du niveau d'eau dans la structure même (MTQ, 2006). Dans le but de conserver un taux d'humidité sous le seuil critique de 85%, les fossés et les systèmes de drainage souterrains, comme les drains mis en place au niveau du sol support, sont utilisés pour minimiser l'apport en eaux latérales et souterraines (MTQ, 2006). Les conditions de drainage générales de l'environnement peuvent être modifiées par l'exécution de travaux à proximité du tronçon diagnostiqué (Assaf, 2003). L'assèchement du sol support qui découle de ces changements engendre une certaine perte de volume du secteur affecté grâce à l'évacuation d'une majeure partie de l'eau qui était présente. Ultimement, la perte de volume se traduit par l'affouillement du support et cause l'affaissement local de la structure souple (MTQ, 2002).

3.1.4 C4 – Sol support

La nature du sol support a un effet capital sur l'évolution de la structure de chaussée mise en place. La cause-famille qui rassemble les causes en filiation au sol support comprend toutes celles reliées :

- ✓ au type de sol de l'infrastructure;
- ✓ à la présence d'un aquifère souterrain;
- ✓ à la nature des matériaux de remblai et/ou de déblai;
- ✓ au manque de support latéral (MTQ, 2002).

Les causes dues à la présence d'une nappe phréatique dans le sol support sont incluses dans la présente famille, puisque l'eau de l'aquifère est en quelque sorte l'agent déclencheur qui

engendre l'action de certaines causes relevant des caractéristiques des matériaux qui composent le sol (Tessier, 1990).

L'infrastructure de la chaussée québécoise est son tendon d'Achille (MTQ, 2006). Elle est présentée ainsi puisque les experts en génie routier sont aujourd'hui capables de formuler des super-enrobés, de construire des structures souples et résistantes ainsi que des systèmes de drainage d'une efficacité inégalée, mais le sol support au Québec demeure gélif dans les Basses Terres du Saint-Laurent, tel qu'illustré par les secteurs orangés de la Figure 3.6.

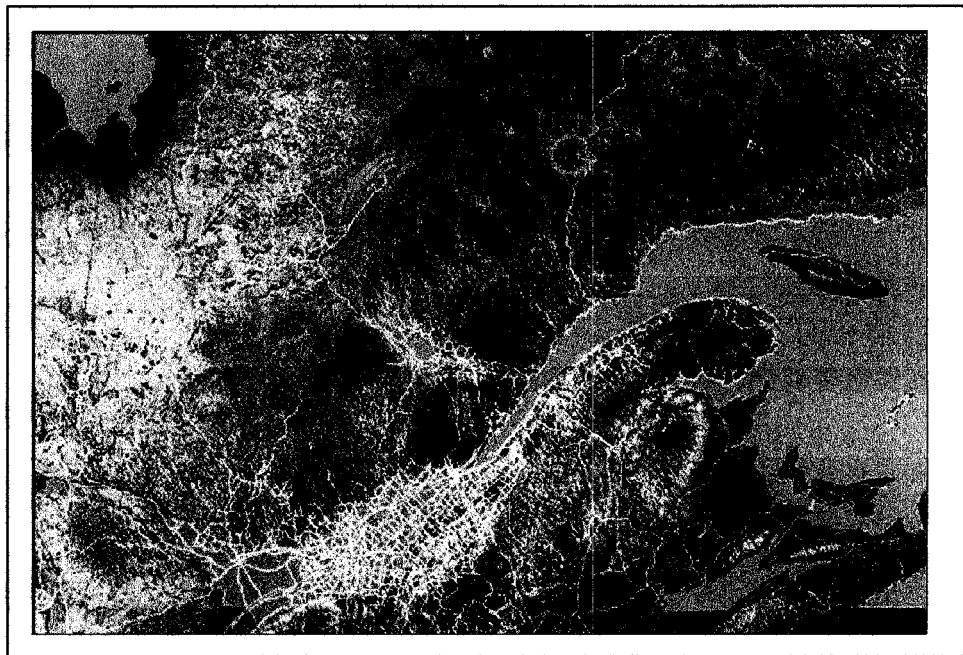


Figure 3.6 *Carte géologique du Québec. (MTQ, 2006)*

En effet, une importante proportion des routes est construite sur des matériaux argileux (MTQ, 2006). En plus d'avoir une sensibilité accrue à l'eau et à la pénétration du front de gel (Tessier, 1990), ces matériaux ne possèdent pas une bonne capacité portante par rapport aux autres types de sol (Holtz, 1991). Des traitements de sol sont disponibles, mais les méthodes usuelles de construction routière québécoise tendent à les utiliser très peu souvent (Assaf, 2003).

On reconnaît une infrastructure gélive par son comportement répétitif et cyclique en présence de gel (MTQ, 2002). Ces matériaux gélifs, comme les argiles et les silts, sont essentiellement constitués de particules fines, voire même microscopiques (Perraton, 2003). Dû à la taille de celles-ci et aux tensions de surface interne qu'elles génèrent, les matériaux argileux et « silteux » sont très peu perméables. Les matériaux granulaires de sol qui comportent plus de 8% de particules plus petites que 80 microns réagissent fortement aux effets du front de gel (Recueil des Méthodes d'essai LC, 2005). Une grande quantité de petites particules augmente le nombre de petits pores internes du matériel, ce qui réduit la quantité de pores plus grossiers. Les accès entre pores plus gros favorisent le drainage interne du matériel. La réduction du nombre de liens direct entre les pores drainants engendre des trajets d'écoulement plus complexes pour le drainage de l'eau vers l'aquifère souterrain (Perraton, 2003). L'eau contenue dans ces matériaux est métaphoriquement emprisonnée à l'intérieur. Dans un contexte normal, l'eau gelée peut atteindre un volume 10% supérieur au même volume d'eau à 4°C; température à laquelle l'eau ne présente aucun gel interne. Par contre, l'effet de confinement de la structure de chaussée, engendré par le type de sol support autour de la structure, tend à accroître verticalement le volume de la structure confinée (MTQ, 2006).

Les matériaux argileux présentent aussi des caractéristiques viscoélastoplastiques (Perraton, 2003). En effet, il est possible que ces matériaux se déforment de façon permanente sous l'effet d'une contrainte appliquée dans le temps (Perraton, 2003). Prenons l'exemple d'un ensemble structural souple qui possède une capacité de portance suffisante pour retransmettre les charges induites par un véhicule lourd au sol support, mais que ce dernier n'assure pas le soutien sans engendrer une certaine déformation définitive. Éventuellement, le profil de la chaussée présentera des signes d'affaissement dans les traces de roues, particulièrement à l'endroit où les véhicules s'arrêtent fréquemment (MTQ, 2002). Cette déformation est en partie due à la différence entre la charge induite par la structure sur le sol support et la charge soutenable par les capacités viscoélastiques du matériel d'infrastructure

(Perraton, 2003). Une partie de la charge totale transférée sur le matériel de support est reprise par la viscosité élastique du matériel et l'autre est responsable de la déformation dite plastique, ou permanente, telle qu'observée à la surface (Assaf, 2004).

Puisque le sol en place est naturellement hétérogène et que ses caractéristiques fluctuent en fonction, entre autres, du taux d'humidité et de la granulométrie (Haas & Hudson, 1994), il réagit différemment selon le secteur de la route analysée. Dans le cas où la variabilité des réactions au front de gel est importante et marquée, il y a fort à parier que des matériaux de déblai ou de remblai inadéquats ont été utilisés lors des travaux de nivellement de l'infrastructure de la route (Assaf, 2003). Le niveau élevé de la nappe phréatique engendre aussi ce type de comportement (MTQ, 2002). Dans le cas où l'écoulement des eaux d'un fossé est restreint dans un secteur par rapport à un autre en raison d'une accumulation de la végétation, le niveau d'eau dans le sol support sera également plus élevé (MTQ, 2006). Grâce à ce changement d'élévation, les effets du gel seront également accrus dans le sol support du secteur affecté (Tessier, 1990), en raison des mécanismes présentés dans la cause-famille C2. Cet effet est illustré à la Figure 10 sous le nom de « Pompage de l'eau alimentant les lentilles de glace ».

Certains types de sol, comme les argiles ou les sols marécageux, sont instables (Tessier, 1990). Les matériaux organiques présents dans les marécages se décomposent lentement mais sûrement. La décomposition de la matière est accentuée par les variations du taux d'humidité interne et, par le fait même, par la quantité d'air présente dans la structure. Les matériaux décomposés génèrent des gaz et des vides. À long terme, la quantité de vide s'accroît pour éventuellement créer l'affouillement du support d'une partie de la chaussée (Tessier, 1990). Il en résulte un affaissement marqué du secteur affecté (MTQ, 2002). Le même résultat peut être causé par des remblais d'argile instable (Bruxelles, 2005). La nature des particules qui composent l'argile tend à la désolidariser en présence d'eau (Holtz, 1991), surtout si elles ont été désorganisées pendant les travaux de construction d'infrastructures souterraines. Les tensions internes du matériel, ou force de Van Der Waals, ainsi que

d'attraction et répulsion, sont affaiblies par le malaxage des particules et causent le fluage de l'argile (Perraton, 2003). À l'état stable, soit après l'exécution des travaux d'excavation et de remblai, les forces internes augmenteront jusqu'à l'atteinte d'une portance comparable à celle d'une argile non remaniée (Holtz, 1991), mais il faut du temps. La réorganisation des particules engendre l'évacuation de l'eau interne et contribue à l'accroissement de ces forces, mais cause aussi une diminution du volume global du matériel (Tessier, 1990). Ces réactions du sol se traduisent physiquement par l'abaissement du niveau final construit de l'infrastructure ou par le relâchement des contraintes de soutien latérales (Bruxelles, 2005). Cette modification de l'environnement cause un tassement local du cours d'eau dans les secteurs urbains.

3.1.5 C5 – Infrastructures souterraines

Les services municipaux enfouis dans les structures souples ont également une durée de vie limitée. En générale, la durée de vie attendue pour les structures municipales construite est inférieure à 50 ans (Brière, 1997), mais plusieurs d'entre elles sont saines et fonctionnelles après plus de 100 ans d'utilisation. Une importante proportion des infrastructures souterraines rencontrées en milieu urbain contribue à la préservation des chaussées en assurant un drainage adéquat de l'ensemble structural, tel que discuté dans les sections 3.1.2 à 3.1.4 de ce chapitre. Or, les infrastructures souterraines peuvent également nuire à l'état de la chaussée, voici les différentes causes intégrées à la présente cause-famille :

- ✓ mauvais état des structures enfouies;
- ✓ structures souterraines à faible profondeur;
- ✓ mauvais état des accès aux services souterrains;
- ✓ impacts dynamiques sur les accès en surface (MTQ, 2002).

Leur durée de vie limitée jumelée à un manque de vigilance des propriétaires causent une carence d'informations sur l'état de détérioration interne de ces structures enfouies

(Cazavant, 2004). Il résulte de ce laxisme un manque d'entretien de la part des gestionnaires des réseaux. Ultimement, la conduite souterraine non entretenue cèdera sous le poids du sol qu'elle supporte (Brière, 1997). Le déplacement vertical des matériaux de remblai situés au-dessus engendre l'affouillement du sol support et cause un affaissement local de la structure flexible (MTQ, 2002). Le ponceau est un autre type de structure souterraine susceptible de causer des affouillements. Dans le cas où ce dernier est en mauvais état et non étanche, il permettra à l'eau véhiculée dans la conduite de s'infiltrer dans les matériaux situés autour de celle-ci. L'accroissement du taux d'humidité affaiblit la structure des granulaires et désolidarise les particules les plus fines de la granulométrie du matériel d'enrobage (Tessier, 1990). Les cas plus graves causent même l'écoulement des particules fines sous l'effet prolongé du passage d'eau. Au début de ce mécanisme, l'espace est repris par le volume d'eau en raison de la pression interne d'écoulement (Brière, 1997). Lorsque l'écoulement d'eau s'affaiblit, les minuscules vides laissés par la migration des microparticules engendrent une réorganisation vers le bas des granulats plus gros, ce qui cause des tassements localisés (Assaf, 2003). Évidemment, ce mécanisme de détérioration s'applique à toutes les structures souterraines en mauvais état. L'envergure des dommages causés à la structure de chaussée est généralement proportionnelle à l'importance de l'affouillement généré par les mouvements de sol ou par l'écoulement des eaux souterraines. Pour ces raisons, il convient de spécifier que l'étendue de l'affaissement observée à la surface de la chaussée est un indicateur de l'importance du bris souterrain qui l'a causé, mais la surface affectée dépend aussi de la profondeur d'enfouissement (Tessier, 1990) et de la nature du matériel de remblai (Holtz, 1991).

D'autres types de structure sont mis en place dans les matériaux granulaires de la structure de chaussée. L'intégrité des installations souterraines des entreprises de distribution, comme Bell Canada ou Hydro-Québec, repose sur la résistance du béton qui englobe les conduits compris dans les massifs de distribution et les chambres enfouies (ETS CTN-104, 1995). Ces éléments ne sont pas souvent en cause dans les mécanismes de dégradation des chaussées souples. Par contre, la présence de ceux-ci est très souvent notée à moins d'un

mètre sous le niveau de la chaussée, ce qui peut causer une variation des capacités de drainage de la couche granulaire et engendrer des soulèvements différentiels (MTQ, 2002). Également, la gélivité du matériel d'enrobage utilisé lors des travaux d'enfouissement de la structure de distribution peut être en cause, puisque les massifs d'utilités publiques sont très souvent enfouis dans une chaussée entièrement opérationnelle (Tessier, 1990).

Les structures d'accès aux services souterrains incarnent la source de détérioration la plus reconnue de la présente cause-famille en raison de leur nombre et de leur positionnement (Assaf, 2004). En effet, seules les cheminées d'accès représentent un lien vertical permettant de rallier la surface de l'enrobé aux conduites ainsi qu'aux services enfouis (Lemire, 2004). Pour cette raison, elles doivent également traverser toutes les couches de la structure souple. Cette souplesse de la structure granulaire et du béton bitumineux leur permet d'épouser les variations de volume causées par les cycles de gel et dégel (Perraton, 2002) alors que ces structures verticales sont destinées à demeurer fixes et indépendantes des fluctuations de la chaussée (Dessau-Soprin, 2003). Le mouvement différentiel et vertical est imposé à la surface de contact entre la couche de revêtement et la structure de l'accès (MTQ, 2002), ce qui cause la fissuration radiale autour de l'accès. L'infiltration des eaux de surface s'effectue entre la couche de revêtement et l'accès pour s'engouffrer sous cette dernière jusqu'à ce que le matériel granulaire draine l'apport en eau vers le fond de la structure de chaussée. Dans le cas où le drainage interne est déficient, le passage répétitif des véhicules force l'eau à migrer vers les joints de la cheminée de l'accès ou vers la surface (Cazavant, 2004). Dans un premier cas, les effets sont variables : fissuration de la cheminée par le gel de la saumure accumulée dans les joints et/ou infiltration de matériaux fins de la couche granulaire dans l'accès pour éventuellement former une cavité autour de la structure verticale (MTQ, 2002). Le deuxième est plus intimement lié aux passages répétés des véhicules sur le pavage autour de l'accès. Ils causent le pompage de l'eau vers la surface à travers la fissure radiale, engendrent la désagrégation du mélange bitumineux et contribuent à aggraver le patron de fissuration observable à la surface (Cazavant, 2004).

Certaines structures, comme les puisards par exemple, sont plus directement affectées par les impacts dynamiques induits par le passage des véhicules lourds sur la tête de l'accès (MTQ, 2002). En effet, la structure de béton des accès est résistante, mais face aux cycles de gel et dégel ainsi qu'aux effets des sels de déglacage, elle ne fait pas le poids à long terme. Le béton structural des accès est affaibli, perd de sa stabilité moléculaire et s'effrite en surface à cause d'une infiltration superficielle des eaux de ruissellement contenant un taux élevé de chlorure de calcium capté par l'accès à la surface (Perraton, 2002). Les anneaux situés près de la surface de roulement sont souvent plus détériorés puisque les véhicules lourds transmettent les impacts dynamiques verticalement à travers la structure de l'accès. Une détérioration prématurée de ces accès est prévisible sur les chaussées fortement sollicitées par le camionnage ou les circuits d'autobus (Cazavant, 2004). La combinaison trafic lourd, effets différentiels du gel sur la structure granulaire et vide encaissant autour de la cheminée tend à causer le déplacement du cadre et le désordre local du profil autour de l'accès (Cazavant, 2004).

3.1.6 C6 – Travaux et mise en œuvre

La mise en œuvre de certaines chaussées, particulièrement celles construites il y a plus de 30 ans, cache souvent bien des surprises. Les causes de l'apparition des défauts, issues des méthodes de construction de l'époque et leurs effets à long terme, étaient méconnues des propriétaires de réseau. À ce jour plusieurs malfaçons sont reconnues pour engendrer certains défauts souvent relevés sur les tronçons routiers, comme :

- ✓ une mauvaise mise en place du mélange bitumineux;
- ✓ un manque de compaction des diverses couches structurales;
- ✓ un joint de construction mal exécuté;
- ✓ une transition de construction inadéquate (MTQ, 2002).

Les essais de "The American Association of State Highway and Transportation Officials" (AASHTO) des années 60 avaient été menés par les Américains dans le but d'évaluer le taux de détérioration dans le temps des structures granulaires sous l'effet des charges répétitives d'un trafic (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007). De ces planches d'essais à l'échelle de l'homme, ils ont élaboré les méthodes de dimensionnement de chaussée traditionnelle (Bruxelles, 2005). Donc, les devis et les règles de l'art ont été implantés pour assurer la durabilité des chaussées construites dans les conditions d'utilisation des années 60, d'où les largeurs de voies étroites des vieilles rues construites à cette époque. Les routes étant construites pour une durée de vie utile moyenne de plus ou moins 25 ans, selon la classe de la route concernée (MTQ, 2006), cette période d'observation a été nécessaire afin de constater l'évolution de ces chaussées souples dans le temps. Malgré un manque de connaissances sur les causes des dégradations observées à ce moment, d'autres aspects de la mise en œuvre des chaussées flexibles ont été ajoutés dans les devis techniques des années 80 (Les Consultants Dessau, 1980). La recherche et le développement de nouveaux essais de contrôle de la qualité ont grandement contribué à l'accroissement de nos connaissances en matière de mise en œuvre (Tessier, 1990). L'aboutissement de documents d'appel d'offres, prescrivant les critères de performance demandés par le client, prouve qu'un changement d'approche a été considéré à partir des années 90 (Haas & Hudson, 1994). À ce jour, plusieurs ouvrages démontrent les effets néfastes des méthodes de mise en œuvre conformes à des règles de l'art obsolètes de compaction (Lemire, 2004), d'épandage et de dosage du liant d'accrochage (Les Consultants Dessau, 1980), de resurfage (Moghadasnejad F., 2005) et de plusieurs autres techniques. Ces dernières décennies, les résultats adéquats selon les prescriptions des cahiers des charges n'étaient pas nécessairement satisfaisants pour les donneurs d'ouvrage. En conséquence, de nouveaux moyens ont été développés pour assurer la qualité des ouvrages en fonction de critères de performance mesurables par les gestionnaires (Assaf, 2003). Certains d'entre eux dépendent plus de la mise en œuvre des travaux que de la qualité des matériaux de base, la mesure de l'Indice de rugosité international (IRI) est un bon exemple.

La cause-famille C6 est réservée aux causes dues à une déficience d'exécution de travaux seulement. Par contre, il est clair que les causes incluses dans cette famille sont intimement liées à la cause-famille correspondant à la nature des travaux réalisés. Il résulte de cette liaison un effet d'entraînement entre un problème de mise en œuvre, considéré comme une cause de l'apparition d'un défaut, et les causes comprises dans les cinq autres familles de ce chapitre. Pour préciser l'effet déclencheur de la présente famille de cause, en voici un exemple : un manque de compaction du support latéral d'une chaussée urbaine peut engendrer l'affaissement local le long des bordures (Famille C4), un point bas non drainé (Famille C3), l'infiltration d'eau de surface (Famille C3) ainsi qu'une faiblesse ponctuelle de la fondation (Famille C2) (Assaf, 2004). Le mécanisme qui comprend l'action de chacune de ces causes est responsable des défauts de surface observés sur la chaussée. En contrepartie, la cause qui a initié cette suite d'événements ne peut être que le manque de compaction latérale, puisque sans la présence de cette dernière, la structure ne se serait pas détériorée de cette façon.

Évidemment, le risque d'une mauvaise mise en place des matériaux augmente avec la complexité du travail à compléter. Il est donc normal d'effectuer un contrôle plus rigoureux de la mise en place des couches de revêtement d'une chaussée flexible par rapport aux travaux d'érection de la sous-fondation en sable, pour ne citer que cet exemple. Dans les faits, la mise en place inadéquate de l'enrobé bitumineux, confirmée par la présence de ségrégation dans le mélange (Cook & Seeds, 2004) ou de joints de construction mal exécutés (MTQ, 2002), peut engendrer d'importants problèmes de fissuration qui seront décuplés par les causes comprises aux causes-familles C1 à C5. Malgré une exécution sans faille des travaux de pavage, la remontée de fissures est inévitable si la préparation des surfaces, comme le scellement de fissures existantes ou la reconstruction des couches inférieures, n'est pas réalisée selon les règles de l'art (Assaf, 2005). Aussi, un manque de compaction des couches de pavage cause spécifiquement les ornières à faible rayon (Assaf, 2004), alors que celles à grand rayon sont plutôt reliées au manque de compaction des

couches granulaires de la structure de chaussée (MTQ, 2002). Également relié aux travaux de pavage, l'excès de liant d'accrochage cause le ressuage des produits bitumineux du mélange lors de la compaction de l'enrobé (Cook & Seeds, 2004), alors que la diminution de la section transversale d'un revêtement représente généralement un plan de faiblesse pour la reprise des efforts réfractaires du béton bitumineux (Assaf, 2004). Enfin, la surchauffe du mélange au moment de l'épandage par la finisseuse (Tessier, 1990) tend à modifier ses propriétés, ce qui le rend plus vulnérable à la fissuration (Assaf, 2003).

Plusieurs phases de construction, changements d'entrepreneurs, méthodes de travail, matériaux provenant de différents bancs d'emprunt, rien n'est identique entre deux phases de construction réalisées sur un même tronçon. La construction de transitions adéquates entre les couches granulaires de chaque phase est nécessaire afin d'améliorer la continuité interne de l'ensemble du tronçon (MTQ, 2002), réduisant ainsi la variabilité des comportements différentiels due aux effets des cycles de gel entre les diverses phases de travail. Enfin, il convient de préciser que dans les années 90, environ 40% des défauts de surface observables ont été initialement causés par l'exécution de coupes et tranchées dans une chaussée souple, fonctionnelle et saine (Tessier, 1990).

3.2 Organigramme des familles de causes

Les familles de causes, résumées par les Figures 3.7 et 3.8, regroupent toutes les causes énumérées dans ce chapitre et les présentent en fonction de leur cause-famille respective. Puisque chacune des six familles est physiquement associable à un élément d'une structure souple typique, les causes incluses dans chacune d'elles relèvent de l'agent agissant dans ce même élément de la structure flexible. Cette filiation a été élaborée afin de mettre en évidence la partie de l'ossature structurale qui est potentiellement problématique.

Les groupes d'essais, présentés au chapitre suivant, permettront l'évaluation de la couche, de sa position physique, de ses caractéristiques matérielles, et/ou bien d'autres propriétés

qui affirmeront la présence des causes mises en évidence par l'outil de diagnostic. Ces essais seront concluants dans la mesure où ils permettent de valider la cause à affirmer. La nature de cette dernière dépend partiellement des caractéristiques de son point d'origine et ce sont précisément ces propriétés qui seront ciblées par les divers essais réalisables en laboratoire et sur les lieux. Pour assurer la vérification des causes possibles, le regroupement de celles-ci a été réalisé en fonction des composantes communes à toute structure de chaussée souple, soit : l'Enrobé bitumineux (Famille C1), la Structure de chaussée (Famille C2), le Drainage (C3), le Sol support (Famille C4), les Infrastructures souterraines (Famille C5), les Travaux et mise en œuvre (Famille C6).

Figure 3.7 Causes de détérioration des chaussées flexibles au Québec
 – Familles C1, C2 ou C3

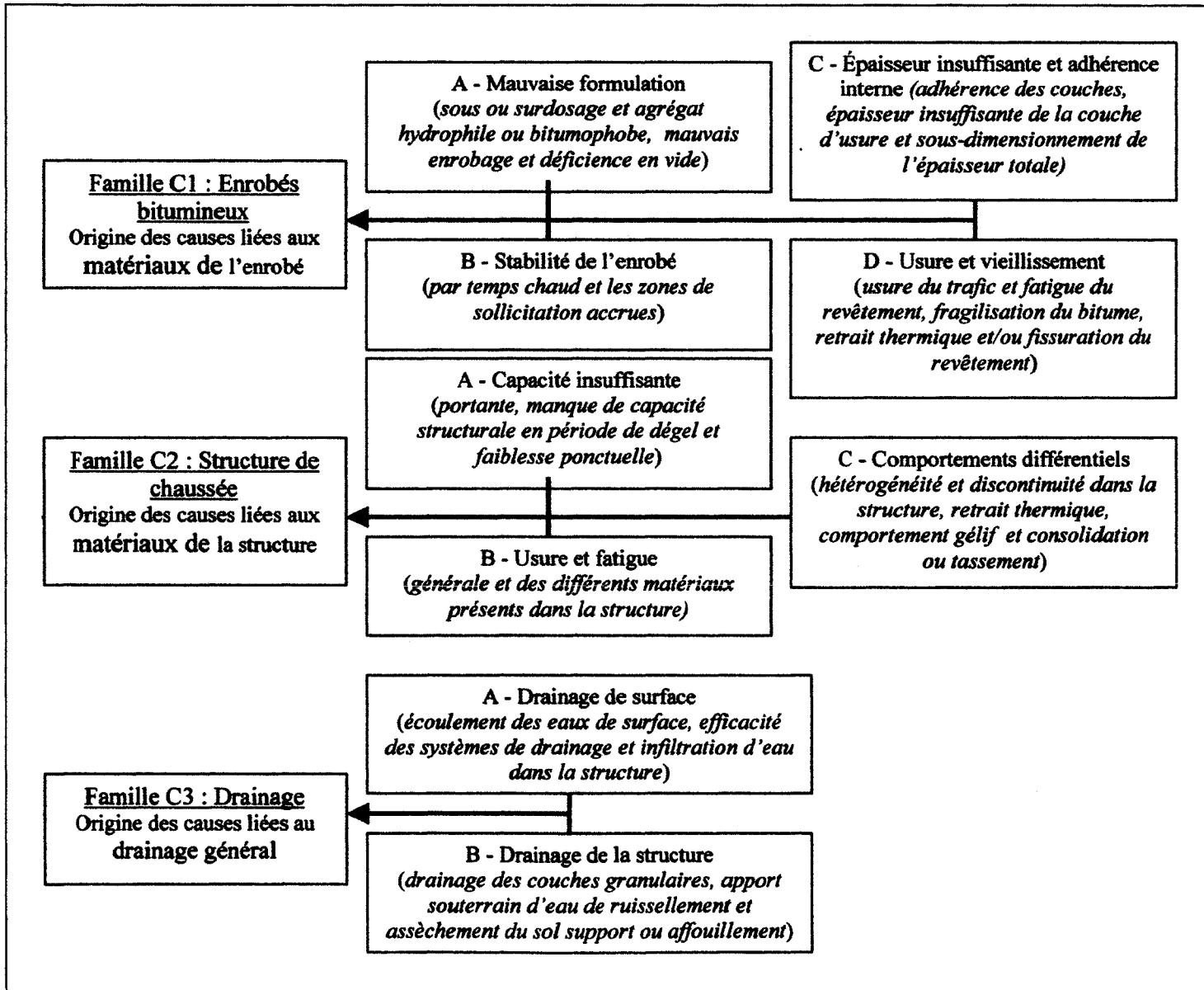
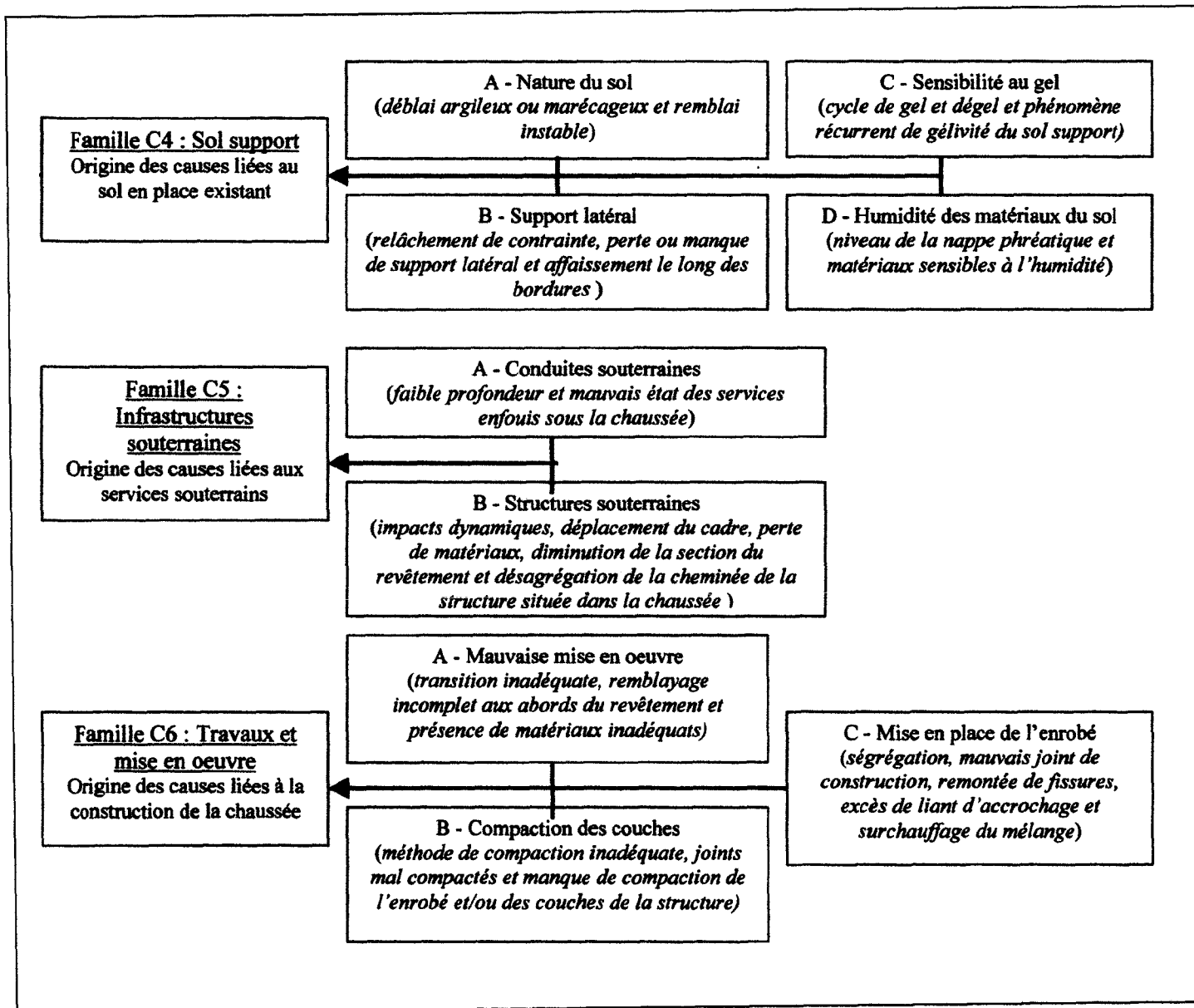


Figure 3.8 Causes de détérioration des chaussées flexibles au Québec
– Familles C4, C5 ou C6



3.3 Synthèse des liens entre les causes et les défauts

La présente section se veut une synthèse des informations présentées dans le Chapitre 2 et le Chapitre 3. Comme discuté au début de ce mémoire, l'outil développé pour le diagnostic d'une chaussée flexible utilise les liens de causalité répertoriés dans la littérature (MTQ, 2002 ou Assaf, 2003), entre les causes incluses dans les six causes-familles de ce chapitre et les défauts observés à la surface du tronçon analysé, inclus dans l'une ou l'autre des défauts-familles.

Chacune des familles de causes en rassemble plusieurs. Puisque chaque cause engendre des défauts de surface, l'ensemble de défauts créé par celle-ci est relié à la cause-famille à laquelle la cause fait partie. L'ensemble de liens formés à partir de causes d'une même cause-famille peut donc être attribué à ce regroupement, puisque les causes étudiées sont toutes incluses dans cette famille. Il résulte de cet exercice un certain nombre de défauts observables sur site qui sont spécifiquement causés par une cause-famille. La répétition de cette analyse pour chacune des familles de causes permet de connaître quel défaut observable est engendré par chacune des causes-familles. Maintenant que les défauts observables sont connus et répertoriés selon les familles de causes, il est possible de rattacher chacun de ces défauts au défaut-famille auquel il a été attribué dans le Chapitre 2. Par cette méthode itérative, tous les liens entre les familles de causes étudiées et les cinq familles de défauts sont mis en évidence et interreliés.

3.3.1 Tableau, organigramme et matrice synthèse

Le Tableau 3.2 et la Figure 3.9 des pages suivantes présentent une synthèse des liens. Dans le cas du Tableau 3.3, il est adressé comme la « Matrice synthèse des causes qui valident les défauts ». Ce dernier tableau récapitulatif permet la validation d'une cause affirmée par l'outil. Cette étape de validation sera explicitement décrite au Chapitre 5, mais essentiellement cette matrice permet de valider la pertinence d'une cause affirmée en fonction du défaut de surface qui avait conduit à l'hypothèse que cette cause était présente.

Tableau 3.2

Tableau synthèse des liens entre les familles de causes et de défauts

Causes	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
Défauts						
D1 - Fissures transversales / mailles / carrelages	×	×	×	Ø	×	×
D2 - Fissures longitudinales	Ø	×	×	×	Ø	×
D3 - Défauts du revêtement	×	×	×	Ø	Ø	×
D4 - Défauts et fissuration dans les pistes de roues	×	×	×	Ø	Ø	×
D5 - Désordre du profil	Ø	×	×	×	×	×

Présence d'au moins un lien direct entre la famille de défauts et la famille de causes : X

Aucun lien direct entre la famille de défauts et la famille de causes : Ø

Figure 3.9 Organigramme des liens entre les familles de causes et de défauts

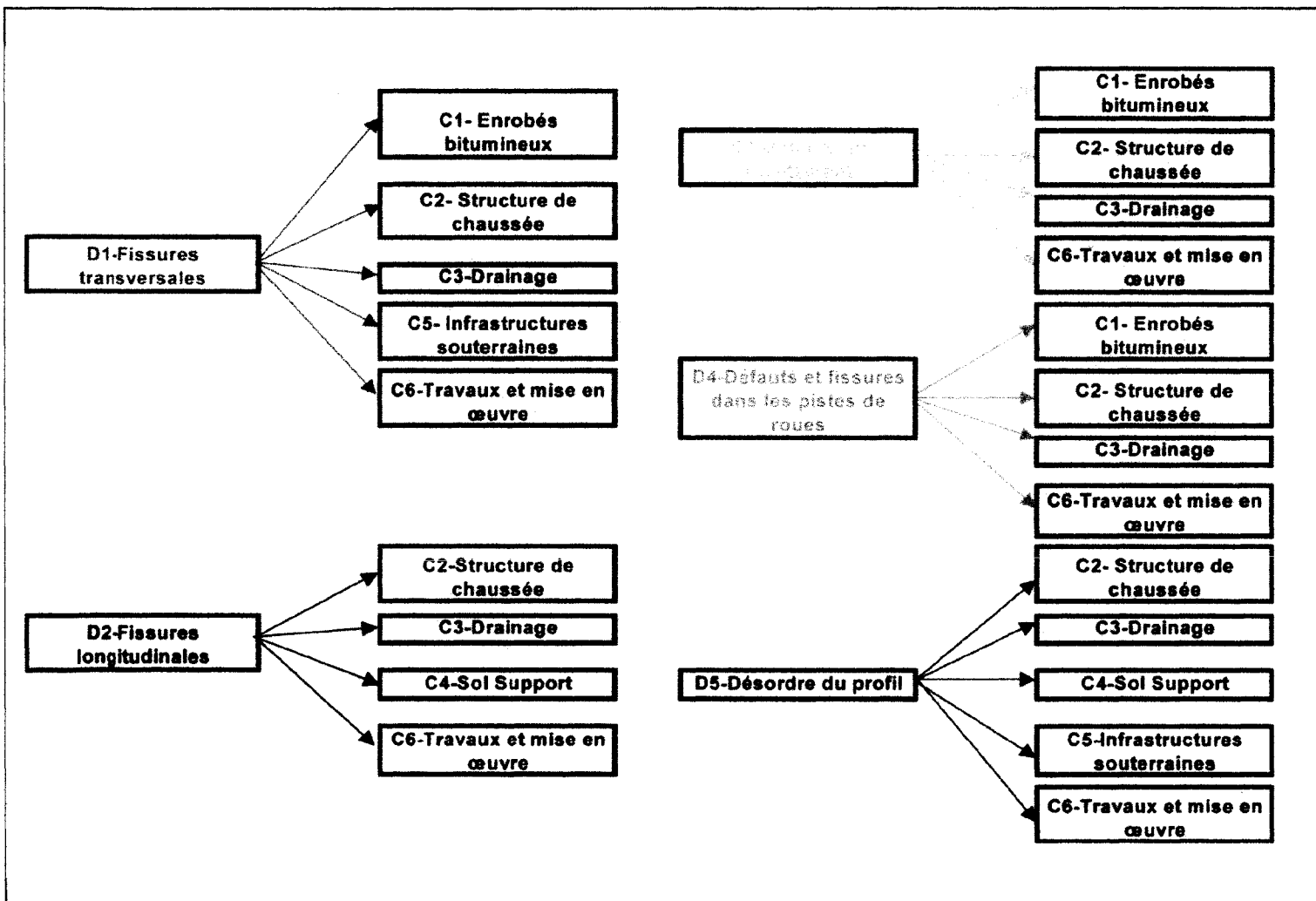


Tableau 3.3

Matrice synthèse des causes qui valident les défauts

Défauts \ Causes	Causes					
	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
D1 – Fissures transversales / mailles / carrelages	retrait thermique – rupture de fatigue – oxydation et vieillissement	retrait thermique des couches granulaires – consolidation et tassement	mouvement hydraulique du sol support	S/O	diminution de la section du revêtement	remontée de fissures – surchauffe du mélange
D2 – Fissures longitudinales	S/O	manque de portance en période de dégel – granulométrie – retrait thermique des couches granulaires – pénétration différentielle du gel	apport en eau latéralement – gel de l'eau dans la structure – mauvais drainage interne et/ou du système de drainage	sol support gélif – tassement et/ou glissement de terrain – instabilité latérale	S/O	largeur de voie trop étroite – mouvement vertical issu d'un manque de compaction – mauvaise construction d'un joint longitudinal – ségrégation à la pose

Tableau 3.3

Matrice synthèse des causes qui valident les défauts (suite)

Causes Défauts						
	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
D3 – Défauts du revêtement	rupture de fatigue – oxydation et vieillissement – dosage du bitume – séparation des granulats par l'eau – déficience en vide – épaisseur insuffisante d'une couche – manque d'adhérence à l'interface	faiblesse ponctuelle – manque de portance en période de dégel	infiltration de surface – apport latéral et /ou souterrain en eau – succion de l'eau vers la structure – mauvais drainage interne – gel de l'eau interne	S/O	S/O	excès de liant d'accrochage – mauvaise méthode de resurfacement – ségrégation à la pose
D4 – Défauts et fissuration dans les pistes de roues	angularité des granulats – rupture de fatigue – usure du mélange – stabilité et dosage du bitume – zone sollicitation accrue – manque d'adhérence à l'interface	manque de capacité structurale – manque de portance en période de dégel – pénétration différentielle du gel – fatigue et/ou usure structurale	manque de drainage des couches de la structure ou de la surface	S/O	S/O	mouvement vertical issu d'un manque de compaction – mauvaise mise en place et/ou compaction du mélange – mauvaise construction d'un joint longitudinal
D5 – Désordre du profil	S/O	hétérogénéité des matériaux – manque de portance en période de dégel	infiltration de surface – apport latéral et /ou souterrain en eau – succion de l'eau vers la structure – gel de l'eau dans la structure	remblai et déblai instables – tassement et/ou glissement de terrain – instabilité latérale – effets récurrents des cycles de gel et dégel – nappe phréatique élevée	désagrégation de l'accès par la saumure – perte de matériaux autour de l'accès – impact dynamique et déplacement du cadre de l'accès – rupture et/ou faible profondeur d'une structure souterraine	mouvement vertical issu d'un manque de compaction – mauvaise transition de construction

CHAPITRE 4

ESSAIS À RÉALISER SUR UNE CHAUSSEE FLEXIBLE

4.1 Présentation des groupes d'essais

Ce chapitre présente et justifie les divers types d'essais qui permettraient d'affirmer la présence d'une cause dans une structure de chaussée flexible. En effet, le très large éventail d'essais disponibles en Amérique (Recueil des Méthodes LC, 2005) et en Europe (Assaf, 2003) rend la tâche de sélection d'un essai particulièrement ardue et déroutante pour l'ingénieur néophyte. Pourtant, le choix des essais est directement responsable d'une majeure partie du budget dépensé pour le diagnostic d'une chaussée souple (Dessau-Soprin, 2003). Nonobstant le coût des essais, le choix d'une intervention inappropriée, résultant d'un mauvais diagnostic, coûte encore beaucoup plus cher à la société. En toute logique, des choix judicieux conduisent à des meilleurs résultats ainsi qu'à des conclusions mieux étayées.

Les mécanismes de dégradation qui s'attaquent à nos structures routières sont engendrés par une ou plusieurs causes. Qu'elles agissent simultanément ou en série, dans tous les cas elles sont étiquetées comme un problème qui actionne les mécanismes, tel que décrit au Chapitre 1. L'évolution de ces derniers dans la structure est accentuée par la contribution hétéroclite des causes présentes simultanément (Assaf, 2005). La modification des caractéristiques de la chaussée peut également engendrer le développement de nouvelles causes dans la structure vieillissante, contribuant ainsi à l'accélération de la décrépitude du tronçon (Assaf, 2003). En raison de l'évolution physico-chimique du mécanisme dans le temps, la contribution de chacune des causes peut varier selon l'état d'avancement du mécanisme de dégradation. Le stade d'évolution n'étant pas connu de l'ingénieur routier au début de l'analyse de la chaussée, il n'est donc pas en mesure de quantifier l'influence de chacune des causes potentiellement présentes (Assaf, 1987). Pour ces raisons, il est très difficile de cibler et d'analyser une seule cause à la fois avec la certitude que l'essai sera concluant.

Étant donné que le contexte de l'essai pratiqué sur site n'est que partiellement contrôlé, en raison des éléments difficilement mesurables (MTQ, 2006), et que le contexte aseptisé d'un laboratoire ne peut que simuler les effets réellement observés sur les lieux (Recueil des Méthodes LC, 2005), les deux types d'essais, in situ et en laboratoire, seront considérés dans ce chapitre. Néanmoins, tous les essais disponibles peuvent être utilisés pour caractériser en détail les matériaux en place dans la structure souple (Assaf, 2005). Donc, la décision de réaliser un essai plutôt qu'un autre dépend de la pertinence des résultats obtenus. L'essai le plus apte à fournir les réponses aux hypothèses de l'analyste maximisera également la complémentarité entre les informations connues et celles nécessaires à l'affirmation d'une ou des causes potentielles.

Dans ce mémoire, il est précisé au premier chapitre qu'un essai représente tous les efforts, quels qu'ils soient, réalisés dans le but d'accumuler des informations sur le tronçon à analyser. En ce sens, l'observation visuelle des lieux et la recherche d'archives sont entendus dans ce mémoire des « essais » pertinents pour apprendre à connaître, respectivement, le milieu dans lequel évoluent les mécanismes de détérioration et l'historique des phases de travail ou de réhabilitation du tronçon. Précisons qu'un grand nombre d'essais offrant des résultats viables, quantifiables et/ou qualifiables, reconnus et discutés dans les cours universitaires de l'École de technologie supérieure, ont été considérés pour élaborer l'outil de diagnostic des chaussées souples. L'Annexe 1 dresse un tableau des essais à réaliser selon le diagnostic préliminaire et autres intrants. Ainsi, une large panoplie de caractéristiques peuvent être analysées par l'évaluation des différents matériaux qui composent le tronçon étudié. Pour assurer le pragmatisme de la méthode systémique préconisée par l'outil, l'ordonnancement des essais a été réalisé en fonction de la pertinence d'exécution de chacun d'eux par rapport à l'information recherchée. En plus, l'Annexe 1 précise l'ordre d'exécution des essais appropriés à l'affirmation des causes. Cette deuxième hiérarchisation assure l'utilité de l'information à interpréter pour une même cause-famille comportant plusieurs causes à affirmer, advenant le cas où les premiers essais

ne seraient pas concluants. La pertinence de l'essai permet de rentabiliser l'information extraite de l'essai réalisé (Assaf, 2003). Pour cette raison, les essais dispendieux seront effectués selon une fréquence beaucoup moindre sur des endroits représentatifs (Tessier, 1990).

Ceci nous amène à discuter des types d'essais justifiés pour l'évaluation d'une chaussée flexible. Avant d'aborder les particularités de chacun des groupes d'essais établis, rappelons que l'Annexe 1 de ce mémoire présente une liste des essais préconisés pour permettre l'affirmation de chacune des causes rassemblées par les six familles de causes du chapitre précédent. Aussi, la numérotation des essais est proposée par sous-groupe dans chaque cause-famille dans le but, entre autres, de proposer les essais moins dommageables pour la route en premier. Par la suite, les essais destructifs sont inscrits à la liste du sous-groupe en fonction de leur complémentarité avec les essais préalablement complétés dans cette cause-famille. Plusieurs d'entre eux nécessitent l'exécution d'un autre groupe d'essais avant qu'ils soient applicables à l'affirmation d'une cause (Recueil des Méthodes LC, 2005). Aussi, certains d'entre eux peuvent être réutilisés pour quelques analyses en laboratoire, ou encore pour le calcul de la durée de vie restante d'une chaussée (St-Laurent, 2004). De plus, une liste de plusieurs autres essais, couramment utilisée ou recommandée pour l'évaluation de ces causes (Assaf, 2003), est également disponible dans cette annexe. Enfin, dans le but de ne pas faire un usage abusif de la notion de famille décrite et utilisée antérieurement, les essais ont été rassemblés par groupe en tenant compte de la nature de chacun d'entre eux.

4.1.1 G1 – Observation visuelle

L'observation des lieux par un analyste averti s'avère un moyen très efficace dans le processus d'affirmation des causes (Assaf, 2005). Ce premier regroupement d'essais est présenté à juste titre, mais il relève plus de l'observation détaillée des lieux que d'une manipulation quelconque.

Le relevé visuel *in situ* des différentes caractéristiques physiques et observables d'une route ainsi que de l'environnement immédiat autour de cette dernière permet de reconnaître plusieurs caractéristiques typiques d'une chaussée flexible, comme :

- ✓ le milieu rural ou urbain;
- ✓ la géométrie horizontale et verticale du tronçon;
- ✓ le type et l'âge des bâtiments riverains à la section analysée;
- ✓ les secteurs en remblai ou en déblai et le type de matériaux utilisés;
- ✓ le type d'écosystème environnant;
- ✓ la nature et la densité de la végétation;
- ✓ les systèmes de drainage en place (Tessier, 1990).

Une observation minutieuse de certains éléments peut avoir une influence capitale dans le diagnostic prodigué par l'analyste par l'entremise de l'utilisation de l'outil de diagnostic d'une chaussée souple, tels que :

- ✓ l'efficacité du ruissellement de surface;
- ✓ l'état des accès aux services souterrains;
- ✓ l'état des services souterrains;
- ✓ l'état de la surface et les traces d'interventions;
- ✓ le type de dégradation de surface et leur sévérité;
- ✓ le type de trafic et les secteurs fortement sollicités de la route;
- ✓ la réaction aux effets du gel du tronçon étudié (Assaf, 2005).

Dans ce dernier cas, un relevé visuel de l'ouverture des fissures longitudinales à la surface de la structure de chaussée doit être réalisé à deux reprises, soit : entre les mois de juin et septembre ainsi que durant la période des mois de janvier à avril. Également, une importante dénivellation, plus de 25 mm (Dessau-Soprin, 2003) entre le plan de la surface de l'accès aux services souterrains et le plan du pavage autour de cet accès, est une indication

révélatrice des effets possiblement récurrents des cycles de gel et de dégel (MTQ, 2002). L'état des infrastructures souterraines, la cause-famille C5, contient probablement les causes les plus dépendantes des relevés visuels pour permettre leur affirmation. Les réseaux d'égouts, certains éléments du réseau d'aqueduc, les chambres enfouies et les ponceaux sont particulièrement propices à ce type d'auscultation (Lemire, 2004). Toutes les méthodes d'inspections télévisées ainsi que les moyens permettant une observation visuelle rigoureuse de toutes structures souterraines sont incorporés au groupe d'essais G1. Aussi, l'échantillonnage de matériaux dans l'unique but de relever visuellement ses caractéristiques, qu'ils proviennent de la route ou de son environnement immédiat, est considéré comme une observation visuelle et fait partie de ce groupe.

Les routes âgées de plus de 25 ans présentent très souvent des signes de réparations ponctuelles, de resurfaçage, d'élargissement de voie, etc. (MTQ, 2006). L'ensemble des étapes de travail complétées à ce jour pour adapter le tronçon aux besoins actuels laisse indéniablement des traces à la surface des sections améliorées. Très souvent réalisées en mode « juste à temps » par les ouvriers syndiqués des services publics, les conditions de travail et les méthodes d'interventions appliquées ne garantissent pas toujours un travail adéquat (Lemire, 2004). Les défauts de construction laissent également leurs marques, comme :

- ✓ la ségrégation ou la macrorugosité du mélange bitumineux;
- ✓ la variation de la largeur d'une voie ou de l'accotement;
- ✓ la macrotexture du mélange en place;
- ✓ l'état d'oxydation des différents mélanges d'enrobés;
- ✓ le changement et/ou l'incompatibilité des matériaux de construction;
- ✓ le mauvais joint de construction entre les étapes de travail;
- ✓ l'ouverture de joints de construction (Assaf, 2005).

Toutes les observations visuelles décrites sont présentées à titre informatif. L'analyste doit s'appliquer à tirer un maximum d'informations d'un relevé exhaustif des lieux. Une innombrable variété de spécificités peuvent être définies et cataloguées pour mieux asseoir l'analyse réalisée par le gestionnaire et conduite par l'outil développé. En raison des faibles coûts généralement associés à la visite des lieux, par rapport à certains autres essais plus complexes et onéreux, ce premier groupe est déterminant dans l'approche du gestionnaire utilisateur de l'outil. Ce groupe d'essais est un incontournable pour toutes les causes-familles du chapitre précédent grâce à sa simplicité d'exécution, à son faible taux d'investissement et à ses qualités de préservation de la chaussée diagnostiquée.

4.1.2 G2 – Historique du tronçon

Le recherche d'informations est globalement le mot d'ordre de ce groupe d'essais. Dans les faits, la route analysée a été construite pour répondre à certains besoins (Bruxelles, 2005). Ces besoins ont déterminé le type d'utilisation retenu par les gestionnaires initialement. Toutefois, force est de reconnaître que les besoins ont pu évoluer durant la période du cycle de vie de la chaussée. L'historique du tronçon peut permettre de répondre à ce type de question.

Les documents d'appel d'offres « émis pour construction » ou les plans « tels qu'exécutés » représentent une source inestimable d'informations puisqu'ils font foi, respectivement, des désirs du client au moment de la réalisation des travaux et illustrent l'inventaire des travaux complétés au moment de la livraison du tronçon (AICQ, 2007). Également, les devis typiquement utilisés par le gestionnaire au moment de l'exécution des travaux exposent les critères de contrôle utilisés et respectés durant la mise en chantier de la route (Dessau-Soprin, 1980). L'analyse et l'interprétation de ces informations permettent de poser des hypothèses sur les spécificités aux contrats, telles que :

- ✓ l'organisme (privé ou public) initiateur du projet;

- ✓ l'année de construction des travaux;
- ✓ la période de réalisation du contrat;
- ✓ les intervenants impliqués;
- ✓ le contexte sociopolitique de l'époque;
- ✓ l'importance des travaux pour ses gestionnaires;
- ✓ les budgets alloués à la construction du tronçon;
- ✓ les phases d'exécution des travaux;
- ✓ les matériaux acceptés pour la construction;
- ✓ l'épaisseur moyenne des couches initialement proposées;
- ✓ type de trafic prévu sur la route;
- ✓ les méthodes de construction de l'époque (Dessau-Soprin, 2003).

Dans les faits, l'ensemble du dossier de construction accumulé durant la période de travail assure la véracité des informations fournies par tous les autres documents disponibles via les services d'archives (Dessau-Soprin, 2003).

Cependant, les tronçons vieux de plus de 30 ans sont très souvent privés d'informations précises sur la majorité des points présentés ci-dessus. Les caractéristiques des matériaux ainsi que les méthodes d'exécution pour réaliser les travaux sont primordiales pour avancer des hypothèses sur les faiblesses potentielles de la route (Assaf, 2003), qu'elles soient dues à une non-conformité aux règles de l'art ou à des conditions de chantier difficiles. Dans ce dernier cas, la période d'exécution pourrait nous confirmer que les travaux ont été réalisés à l'automne, où les températures oscillent entre 5 °C et -5°C. Dans ces conditions climatiques, l'humidité optimale des matériaux granulaires, nécessaire pour atteindre un taux de compaction conforme, est difficilement atteignable (Dessau-Soprin, 2003). Les travaux de compaction des couches granulaires sont donc une source potentielle de causes de détérioration, puisque ces travaux ont été réalisés dans des conditions difficiles. Cet exemple particulier démontre le genre de déduction dont les gestionnaires avertis peuvent tirer profit lors de l'utilisation de l'outil développé dans ce mémoire. Dans le même ordre

d'idées, les traditionnelles opérations de compaction du revêtement bitumineux, réalisées à des températures près du point de congélation, peuvent engendrer le déchirement de la surface de l'enrobé (Lemire, 2004). Ce phénomène est dû au refroidissement rapide de la surface de contact de l'enrobé avec l'air ambiant alors qu'à l'intérieur de la couche compactée, la température est beaucoup plus élevée. La différence de température engendre un changement de comportement du mélange sous l'effet du rouleau compresseur, respectivement de l'état plastique à viscoélastoplastique, entre la surface et l'intérieur de l'enrobé bitumineux (Perraton, 2003). La déformation viscoélastique de la partie interne de la couche engendre des microfissures, invisibles à l'œil nu, à la surface du revêtement devenue plastique en raison des basses températures. À leur tour, ces microfissures contribuent à l'accroissement de l'infiltration d'eau entre les granulats et le bitume (Assaf, 2003). Sous l'effet du temps, ce type de malfaçon réalisé lors de la mise en oeuvre des travaux de pavage cause ultimement des problèmes de désagrégation du revêtement, de fissurations ou de pelade des couches supérieures d'enrobés (Assaf, 2005).

Étant donné que l'analyse des mécanismes de détérioration est très souvent effectuée sur des tronçons peu documentés, les méthodes de recherche indirecte de l'information doivent être considérées (Haas & Hudson, 1994). Entre autres, les sources suivantes contribuent à la collecte d'informations pertinentes :

- ✓ le service d'archives de l'organisme;
- ✓ le service d'archives des journaux locaux;
- ✓ les archives administratives de la municipalité;
- ✓ les dates d'octroi de contrats;
- ✓ les phases de développement du réseau routier ou du secteur;
- ✓ les commerçants et/ou résidents du secteur;
- ✓ les firmes et entrepreneurs impliqués.

Considérées comme futiles ou incomplètes dans plusieurs des cas, les informations indirectes sont viables lorsqu'elles sont confrontées les unes aux autres. Souvent, le manque de précision de certaines de ces informations n'a que peu d'importance, un ordre de grandeur étant suffisant. De plus, l'évolution temporelle du mécanisme de détérioration activé et soutenu par les causes présentes engendre un tel niveau de décrépitude qu'une précision annuelle des connaissances n'affecte en rien le diagnostic soutenu par l'outil. De surcroît, plusieurs renseignements critiques sont relatés à partir des souvenirs contenus dans une faculté qui oublie. Par contre, les effets du temps, combinés à ce vague souvenir, peuvent affirmer une cause potentielle. Il est donc important d'effectuer une recherche exhaustive des informations enregistrées à divers endroits. De cette façon, les caractéristiques et les causes affirmées par l'obtention de résultats, consécutifs à l'exécution des essais choisis, sont mieux définies grâce à une interprétation plus éclairée de ceux-ci (Assaf, 2003).

Les efforts déployés dans le groupe d'essais G2 semblent, dans bien des cas, plus ou moins rentables au moment de leur exécution. Il n'en demeure pas moins qu'ils sont toujours moins coûteux que la majorité des autres groupes d'essais. Aussi, lors de l'évaluation du tronçon au moyen d'essais plus dispendieux, les informations historiques détenues par l'analyste multiplient l'efficacité des résultats qui permettent l'affirmation des causes potentielles par l'approche systémique de l'outil.

4.1.3 G3 – Estimation du trafic

Le nom de ce groupe d'essais résume son domaine d'application. L'estimation du trafic permet d'analyser une chaussée au moyen des différentes méthodes de conception des chaussées (Assaf, 2003). Les logiciels, tels que « Chaussée et Chaussée 2 » fournis gratuitement sur le site du MTQ (MTQ, 2006), permettent de vérifier la capacité portante d'une structure spécifiée par l'utilisateur du logiciel en fonction d'un certain trafic imposé lors de l'analyse (Bruxelles, 2005). Dans le cas où ils seraient utilisés pour la conception

d'une chaussée neuve, les caractéristiques de la structure et des matériaux spécifiées dans le modèle devront être contrôlées lors de la construction de la structure souple (Tessier, 1990). Pour une chaussée existante, le même cheminement permet d'évaluer si la structure analysée possède la portance nécessaire pour soutenir le trafic présent, et ce, selon la durée de vie prévue (St-Laurent, 2004). L'estimation du trafic peut être effectuée en fonction de la vocation actuelle et/ou antérieure de la route étudiée, ou bien par le relevé systématique du nombre et type de véhicules qui circulent sur le tronçon durant une période témoin, comme : les heures de pointe, les jours de semaine, les périodes de dégel, etc..

Advenant le cas où l'entrée des données sur le trafic estimé engendre une réponse positive, le résultat sous-entend que la structure en place ne souffre pas de causes liées à ce trafic (MTQ, 2006). Cependant, le logiciel d'analyse structurale est basé sur des modèles qui ne considèrent pas l'environnement et les spécificités du tronçon (Assaf, 2005). En effet, les informations entrées dans le logiciel sont basées sur les connaissances historiques de la route étudiée. Celles-ci ne tiennent pas compte des modifications encourues par la présence de causes durant toutes les années de service de la chaussée étudiée, puisqu'elles sont inconnues du gestionnaire sans une analyse plus poussée du tronçon. Donc, le résultat positif permet d'affirmer que la route décrite et établie à ce stade du diagnostic assure la portance nécessaire au soutien du trafic véhiculé depuis sa mise en service jusqu'au moment de l'utilisation du logiciel.

Il a été démontré dans le Chapitre 3 que les causes tendent à modifier les caractéristiques de la structure souple initialement érigée. Grâce à ces précisions, l'analyste qui reçoit une réponse positive du logiciel de dimensionnement, et ce malgré l'observation de défauts typiquement causés par le trafic, peut alors conduire son analyse vers les différents changements potentiellement subis par la route depuis son utilisation (Assaf, 2003). Dans le cas où l'analyse du logiciel transmet une réponse négative après la confrontation du trafic et de la structure connue, l'utilisateur est en mesure de conclure que la chaussée n'a pas été

conçue pour l'utilisation actuelle et que les défauts relevés sont, en partie, causés par le trafic imposé jusqu'à présent (Assaf, 2003).

4.1.4 G4 – Essais non destructifs

Ce groupe d'essais rassemble tous les essais non destructifs qui peuvent être utilisés pour déterminer les diverses caractéristiques d'une structure de chaussée flexible. Les essais non destructifs sont définis comme des essais qui n'engendrent pas ou très peu de changement à la structure originale (Haas & Hudson, 1994).

Le nucléodensimètre, présenté à la Figure 4.1, est certainement l'appareil d'essais non destructifs le plus couramment utilisé sur les chantiers de construction de route au Québec (Dessau-Soprin, 2003). En effet, cet appareil est utilisé pour vérifier la compacité d'un matériel en place dont la densité ultime est connue (Dessau-Soprin, 2003). Cette caractéristique est chiffrée en laboratoire afin d'atteindre le taux de compaction maximale du matériel en conditions contrôlées (Recueil des Méthodes LC, 2006). Ce dernier fait office de référence pour les essais au chantier dans le but de vérifier la conformité des travaux de mise en place du matériel. Ce type d'essais est réalisable sur tous les matériaux dits granulaires et poreux qui nécessitent un contrôle de la densification (Tessier, 1990). La plupart du temps, cet essai est réalisé pour vérifier le taux de compaction atteint lors des opérations en chantier. Aussi, il peut déterminer le taux d'humidité et la densité du matériel situé à moins de 30 centimètres sous la surface analysée (Dessau-Soprin, 2003). Dans le cas d'une utilisation sur des routes âgées, cet essai peut être utilisé pour vérifier la densité d'un enrobé par rapport aux valeurs de référence connues grâce aux recherches sur l'historique du tronçon. Tel que précisé antérieurement, le manque de compaction peut être la cause de la formation d'ornières à faible rayon. La mesure de la densité du mélange bitumineux dans les pistes de roues comparée à celle mesurée en tout autre point de la surface permet d'affirmer la présence de cette cause en se basant sur le taux de compaction de référence (Assaf, 2003).

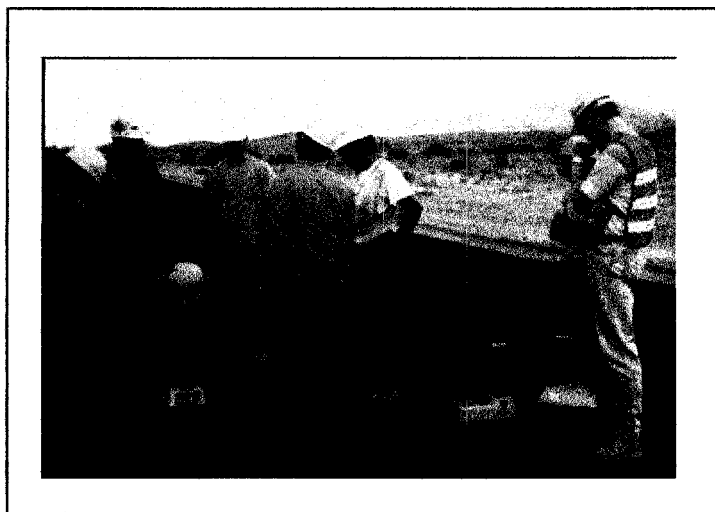


Figure 4.1 *Étalonnage de nucléodensimètres sur une couche de pavage densifiée.*

(MTQ, 2006)

Les essais de portance précisent la capacité portante de la structure souple. Les types d'essais peuvent varier mais le principe de base demeure le même, soit : le chargement de la chaussée à un endroit donné et la mesure de la déformation verticale de surface engendrée par l'application de la contrainte (Assaf, 2003). Le calcul du taux de déformation, en fonction de la distance entre la charge et le point de mesure, permet de qualifier et de quantifier l'aptitude de la structure à supporter la contrainte imposée par un camion lourd sur la surface analysée (St-Laurent, 2004). En effet, il y a plus d'une dizaine d'essais qui ont été développés (Haas & Hudson, 1994), ou bien en cours de recherche (Assaf, 2003), qui se basent sur ce principe. Le plus simple, appelé la « Poutre-Benkelman », permet l'évaluation ponctuelle de la capacité portante de la chaussée évaluée sous l'effet du passage d'un ECAS (Tessier, 1990). Cet essai est recommandable pour une analyse ponctuelle destinée à l'affirmation d'une cause liée à un manque de capacité portante locale grâce à sa simplicité d'exécution et à son faible coût.

D'autres essais sont beaucoup mieux adaptés à des campagnes de vérification de la portance d'un tronçon entier. Dans ce cas, il est préférable d'opter pour les essais de portance

automatisés, qui permettent l'acquisition de données et le calcul postopératoire des résultats de l'essai (St-Laurent, 2004). Comme illustré à la Figure 4.2, ces appareils sont généralement montés sur des remorques qui permettent de faciliter les déplacements (Assaf, 2003). L'essai réalisé par ce type d'équipement est l'application d'une charge dynamique, plus représentative du passage d'un véhicule à vitesse normale qu'un essai statique (St-Laurent, 2004), qui induit une onde de choc dans la structure à analyser. La déformation de la surface est mesurée à plusieurs endroits spécifiques. Elle est captée par des géophones soigneusement calibrés pour mesurer précisément la déformation sous chacun d'entre eux (Haas & Hudson, 1994). L'équipement nécessaire à ce type d'essais est dispendieux et n'est donc pas accessible à tous les budgets. Cependant, dans le contexte où l'évaluation de la capacité portante de plusieurs tronçons doit être effectuée, la location ou l'octroi d'un contrat pour une campagne d'auscultation s'avère une solution très efficace. Surtout pour un gestionnaire de réseau qui réduit au minimum le nombre de déplacements en maximisant le nombre de kilomètres à évaluer dans un même contrat sous-traité (Assaf, 2003).

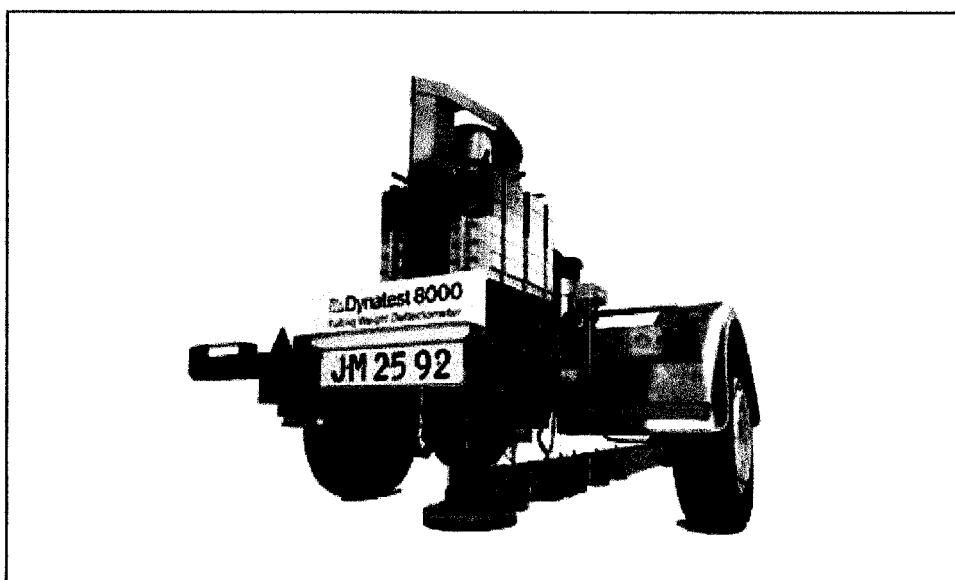


Figure 4.2 Remorque Dynatest® 8000 Falling Weight Deflectometer.

(Dynatest, 2006)

Le but de ces essais est de déterminer deux types de capacité portante : la portance maximale instantanée en un point précis ou la portance répétitive appliquée par un véhicule type en fonction du trafic estimé (St-Laurent, 2004). La collecte de données doit être réalisée sur le terrain en fonction du type d'information désirée, de la variabilité des caractéristiques de la structure de chaussée et des conditions climatiques de la période où les essais seront réalisés (Assaf, 2003). Une méthode à deux étapes s'adapte bien au relevé de portance (Haas & Hudson, 1994). En premier lieu, les essais sont réalisés à de grands intervalles réguliers. Par la suite, en fonction de la variabilité des résultats obtenus sur un même tronçon, les secteurs qui présentent le plus grand écart mesuré sont réévalués plus exhaustivement. Ces essais sont exécutés dans le but de connaître la rigidité de la structure à l'essai, au moment de l'essai, par rapport à celle nécessaire à l'utilisation souhaitée par les gestionnaires. Plusieurs méthodes d'analyses des résultats sont suggérées (Haas & Hudson, 1994). Elles sont toutes regroupées dans les cinq catégories suivantes :

- a) la comparaison des déformations observées par rapport aux déformations tolérées pour assurer le niveau de services prévu pour ce tronçon ;
- b) la comparaison des déformations observées par rapport aux critères d'acceptabilité calculés en fonction des modules élastiques des différentes couches de la structure de chaussée ;
- c) l'utilisation des déformations mesurées pour le calcul de la durée de vie restante en fonction du trafic estimé pour ce secteur ;
- d) l'utilisation des déformations mesurées pour le calcul des propriétés des différentes couches au moyen de méthodes de rétrocalcul ;
- e) la combinaison des méthodes de caractérisation en laboratoire et de rétrocalcul pour déterminer les valeurs limites de fatigue des différents matériaux qui composent la structure (Haas & Hudson, 1994).

Globalement, les appareils de mesure de déflexion peuvent être regroupés en quatre familles :

- a) appareils statiques mesurant la réaction du pavage à l'enlèvement d'une charge ;
- b) appareils vibratoires mesurant la réaction du pavage aux vibrations émises ;
- c) appareils à impulsion mesurant la réaction du pavage à une masse qui tombe d'une hauteur et d'un point connu avec une masse connue ;
- d) les appareils dits « multimodes » (Haas & Hudson, 1994).

Chacune des cinq catégories d'interprétation des résultats ainsi que les quatre familles d'appareils de mesure, décrites ci-dessus, sont comprises dans le groupe d'essais G3. Enfin, il importe de préciser que les essais compris dans ce groupe sont coûteux, mais ils ne causent pas de dommage à la chaussée étudiée et les résultats obtenus présentent un très fort potentiel d'analyse pour évaluer la portance d'une chaussée (Assaf, 2003).

4.1.5 G5 – Carottage de la chaussée

L'extraction d'un échantillon de la structure en place est une des opérations les plus couramment exécutées pour l'analyse des matériaux *in situ* d'un tronçon routier. Le groupe G5 a été formé afin de démarquer l'opération de carottage, ou de prélèvement d'une plaque, de la chaussée des autres analyses réalisées à partir de cet échantillon et généralement exécutées en laboratoire. Ce groupe d'essais comprend exclusivement la prise d'une plaque ou d'une carotte, comme l'exemple illustré à la Figure 4.3. Dans le but de clarifier le lexique de ce mémoire, il est spécifié que le carottage ne peut être réalisé qu'à partir de la surface originale d'un tronçon existant à analyser. En effet, la classification des essais répertoriés à l'Annexe 1 est présentée en considérant que cet essai est exclusivement applicable dans les conditions prescrites ci-dessus pour l'affirmation des causes potentielles. Par contre, il peut être jumelé à d'autres essais lorsque ceux-ci ne prévoient pas l'extraction de l'échantillon dans la description des opérations à effectuer. L'utilisation de ce groupe

d'essais est propice, entre autres, à l'étude du plan de rupture d'une fissure relevée à la surface de la chaussée dans le but d'en étudier l'origine (Assaf, 2003).



Figure 4.3 *Carotteuse montée sur un camion de service. (MTQ, 2002)*

Considérée comme un essai destructif, la prise d'une carotte n'affaiblit pas de façon importante la structure d'une chaussée souple (Haas & Hudson, 1994), puisque la surface affectée par la prise de l'échantillon est minime par rapport à la surface transversale unitaire du tronçon analysé (Assaf, 2005). Aussi, l'opération peut être réalisée à l'extérieur des traces de roues des véhicules, rendant l'opération moins préjudiciable pour la surface carottée, à moins que les informations désirées nécessitent l'extraction dans cette section du pavage.

4.1.6 G6 – Essais du laboratoire des chaussées

Ce groupe d'essais est précisément réservé aux essais normalisés par la Direction du laboratoire des chaussées du ministère des Transports du Québec. Étant donné que ceux-ci sont clairement définis et que l'organisme gouvernemental émet une mise à jour annuelle du Recueil des Méthodes d'essai LC, ils incarnent une source de référence importante pour mesurer les diverses caractéristiques d'une structure de chaussée flexible québécoise (DLC, 2005).

Le document officiel couvre l'ensemble des essais destinés aux matériaux de construction et d'entretien utilisés par le gouvernement du Québec. De plus, les essais proposés dans le guide ont été choisis et étalonnés pour leur usage au Québec particulièrement (DLC, 2005). Ils sont adaptés aux structures construites pour notre climat, selon les normes en vigueur et reflètent les dernières innovations technologiques en matière d'essais québécois (MTQ, 2006). Les essais sont bien documentés en prenant soin de fournir les informations suivantes à l'utilisateur :

- ✓ l'objet;
- ✓ les références;
- ✓ les définitions;
- ✓ le principe d'essais;
- ✓ l'appareillage;
- ✓ le mode opératoire;
- ✓ les calculs et l'expression des résultats;
- ✓ le procès-verbal de l'essai;
- ✓ le rapport d'essais (DLC, 2005).

Évidemment, le recueil normalise seulement les essais destinés à la caractérisation des matériaux retrouvés dans les structures de chaussée gérée par le MTQ. Étant donné que tous les essais de ce groupe sont à réaliser en laboratoire, le prélèvement d'un échantillon représentatif est nécessaire à l'exécution de chacun d'entre eux. Pour cette raison, la prise de l'échantillon est implicitement sous-entendue dans le mode opératoire de chacun des essais de ce groupe. La méthodologie pour la prise de l'échantillon représentatif, décrite dans le recueil, doit être systématiquement suivie, et ce, en fonction du matériel prélevé (DLC, 2005). Cette première opération est incluse dans tous les essais du groupe et n'est donc pas spécifiée à l'Annexe 1 qui présente l'ordonnancement des essais à réaliser.

Tous les essais dans le guide sont pertinents. Cependant, certains d'entre eux sont mieux adaptés à l'évaluation d'une chaussée âgée qui présente des défauts de surface (MTQ, 2006). Dans le but de simplifier la nomenclature de ce mémoire, les essais les plus couramment recommandés dans l'annexe sont désignés par les lettres LC, provenant du titre du Recueil des Méthodes du laboratoire des chaussées, suivies d'un indice spécifiant le type d'essai à réaliser. De cette façon, certains essais, tel l'essai répertorié sous l'appellation « LC_A » comprenant l'échantillonnage ainsi que le module complexe, ont pu être jumelés pour former une des combinaisons destinées à l'affirmation d'une ou plusieurs causes.

4.1.7 G7 – Caractérisation et autres

Tous les autres essais de caractérisation en laboratoire qui ne font pas partie des essais LC normalisés par le MTQ sont inclus dans le groupe G7. Ce groupe a été établi afin de permettre l'intégration des essais pertinents pour le diagnostic de la route, répertoriés dans la « Liste des essais qui affirme la famille de causes » de l'Annexe 1, qui ne sont pas officiellement reconnus par le ministère.

caractérisation usuellement utilisé au Québec. A priori, un gestionnaire qui utilise déjà les relevés topométriques pour quantifier les effets du gel, peut incorporer cet essai dans la liste présentée en annexe en remplacement de son égal dans la liste. L'ajustement de la liste de l'Annexe 1 lui permettra d'affirmer certaines causes potentielles au moyen des résultats obtenus grâce à l'exécution d'essais couramment utilisés par l'organisme auquel il fait partie. En résumé, ce groupe permet une certaine adaptation des essais préconisés par les gestionnaires de la route analysés en fonction des causes à affirmer et des pratiques couramment appliquées par ce même organisme.

4.1.8 G8 – Forage des couches de sols

Les méthodes de forage de sols sont fréquemment utilisées pour échantillonner les différentes strates du sous-sol lors des études de caractérisation menées dans le but de mieux asseoir la conception d'une structure de chaussée souple (Dessau-Soprin, 2003). Malgré l'efficacité de ce type d'échantillonnage, l'équipement, les déplacements ainsi que la main-d'œuvre nécessaires à l'exécution d'une étude au moyen de puits par forage engendrent des frais importants, de l'ordre de milliers de dollars (Dessau-Soprin, 2003). Étant donné que l'outil de diagnostic est conçu pour l'analyse de route existante, les puits permettraient de prélever un échantillon représentatif des matériaux du sous-sol. Cependant, l'avantage des puits est d'assurer un prélèvement représentatif des couches de sol en profondeur, plus de 2,0 mètres, alors qu'une structure souple québécoise présente une épaisseur variant entre 0,5 mètre et 1,5 mètre d'épaisseur (MTQ, 2006). Le front de gel peut atteindre 3,0 mètres de profondeur (MTQ, 2006), donc l'épaisseur maximale des matériaux qui cause les défauts relevés ne devrait pas dépasser 2,0 à 3,0 mètres d'épaisseur à partir de la surface pavée. Les excavations à cette profondeur sont plutôt courantes dans les secteurs habités. En vérifiant la nature des sols rencontrés lors de travaux réalisés à proximité de la route analysée, il est possible de connaître la nature du sol support tout près du tronçon étudié sans avoir recours aux dispendieuses méthodes de forage (Assaf, 2003). Il apparaît clair que pour caractériser les multiples couches de sol support, le forage est nécessaire, mais l'affirmation des causes

l'outil de diagnostic est conçu pour l'analyse de route existante, les puits permettraient de prélever un échantillon représentatif des matériaux du sous-sol. Cependant, l'avantage des puits est d'assurer un prélèvement représentatif des couches de sol en profondeur, plus de 2,0 mètres, alors qu'une structure souple québécoise présente une épaisseur variant entre 0,5 mètre et 1,5 mètre d'épaisseur (MTQ, 2006). Le front de gel peut atteindre 3,0 mètres de profondeur (MTQ, 2006), donc l'épaisseur maximale des matériaux qui cause les défauts relevés ne devrait pas dépasser 2,0 à 3,0 mètres d'épaisseur à partir de la surface pavée. Les excavations à cette profondeur sont plutôt courantes dans les secteurs habités. En vérifiant la nature des sols rencontrés lors de travaux réalisés à proximité de la route analysée, il est possible de connaître la nature du sol support tout près du tronçon étudié sans avoir recours aux dispendieuses méthodes de forage (Assaf, 2003). Il apparaît clair que pour caractériser les multiples couches de sol support, le forage est nécessaire, mais l'affirmation des causes n'est que rarement étudiée jusqu'à cette profondeur de la structure (Assaf, 2005). Les frais engrangés par les essais de ce groupe sont justifiés pour les activités de conception routière afin d'assurer la capacité portante nécessaire à la reprise des charges induites à l'infrastructure (Bruxelles, 2005). Dans le cas du diagnostic d'une chaussée, les diverses méthodes d'essais présentées dans les groupes G1 à G7 permettent la caractérisation en tout point d'une structure de chaussée existante. Advenant le cas où l'ensemble des essais réalisés ne saurait affirmer les causes à affirmer, l'analyste est en mesure de déduire que la ou les causes problématiques émanent probablement du sol support. À ce stade de l'analyse, les caractéristiques reconnues par les essais du groupe G2 – Historique du tronçon – ainsi que les observations visuelles (groupe G1), ou tout autre essai complété, permettent l'affirmation de la cause dans la majorité des cas. Enfin, si la cause n'est toujours pas affirmée, le forage des couches de sol support et les essais de caractérisation de celles-ci devront être entrepris dans le but de préciser et d'affirmer les causes sous-tendues par les comportements réactifs du sol support (Assaf, 2003).

4.2 Synthèse des liens entre les essais et les causes

Dans un premier temps, il est important d'effectuer un bref rappel des huit groupes d'essais élaborés à la section précédente. Le Tableau IV présente la nomenclature utilisée dans ce mémoire ainsi qu'une brève description de la nature des essais inclus dans chacun des groupes. Ces derniers regroupent plusieurs essais identiques ou de même nature qui permettent l'affirmation d'une ou plusieurs causes potentielles.

Évidemment, un essai comme l'observation visuelle s'applique à un grand nombre de causes, et donc, à un grand nombre de familles de causes également. Dans le but de ramifier les liens entre chacun des groupes d'essais et les causes-familles qui bénéficient de l'usage de celui-ci, le Tableau V a été élaboré. Les liens présentés dans ce tableau proviennent du potentiel d'affirmation des causes par l'exécution de chaque essai spécifié à l'Annexe 1. Un essai est associé aux causes qu'il sera possible d'affirmer grâce aux résultats extirpés. Chacune des causes reliées à l'essai fait partie d'une cause-famille connue et établie au chapitre précédent. Par association, le groupe d'essais auquel il fait partie est donc indirectement lié à la cause-famille à laquelle la cause est intégrée. En répétant l'exercice pour chaque groupe d'essais, tous les liens entre les groupes d'essais réalisables et les six familles de causes sont mis en évidence et interreliés.

Tableau 4.1
Liste des groupes d'essais

No	Abréviation	Nom du groupe	Description générale des essais inclus
1	OV	Observation Visuelle	Relevé visuel <i>in situ</i> des différentes caractéristiques observables qui révèlent la présence de la cause à affirmer.
2	HIST	Historique du tronçon	Relevé de toutes les informations à caractère historique qui peuvent être retracées aux moyens d'archives ou par la consultation de gens impliqués lors des différentes phases de travail.
3	TRAF	Estimation du Trafic	Réalisée sur place sous forme de relevé partiel du DJMA ou bien en fonction de la nature du tronçon étudié, le trafic est estimé selon les causes à affirmer.
4	FWD	Essais non destructifs, incluant le type Falling Weight Deflectometer	Ce groupe comprend tous les essais de type non destructif, incluant les essais non destructifs de portance, réalisés afin de calculer la capacité portante d'une chaussée dans le but d'affirmer les causes associées à une déficience de portance.
5	CAR	Carottage de la chaussée	Carotte ou plaque prélevée sur le tronçon étudié dans le but d'effectuer des essais destructifs sur un échantillon représentatif du tronçon.
6	LC	Essais du Laboratoire des Chaussées ou équivalent	Comprend tous les essais normalisés par le Laboratoire des Chaussées du Québec. Tous les essais qui nécessitent la prise d'un échantillon représentatif selon les normes LC. La nomenclature appliquée pour ce mémoire : LC_A = module complexe; LC_B = pourcentage de vide; LC_C = pourcentage de particule fracturée; LC_D = teneur en eau des granulats; LC_E = plage PG du bitume; LC_F = pourcentage d'usure; LC_g = écoulement des granulats.
7	CARACT	Caractérisation et autres	Tous les essais de caractérisation, présentés ou non dans la liste des essais préconisés, peuvent être classés dans ce groupe. La pertinence de ceux-ci est considérée en fonction des causes à affirmer et des pratiques couramment utilisées par le gestionnaire du réseau.
8	FORAGE	Forage des couches de sol	Le forage consiste à l'extraction sous forme cylindrique des différentes couches de matériaux qui composent la structure ainsi que le sol support sous la chaussée. Les essais de caractérisation qui suivent l'extraction sont partie intégrante de ce groupe d'essais.

4.2.1 Organigrammes et matrice synthèse

Le Tableau V de la page précédente a présenté les possibilités d'affirmation entre les familles de causes et les groupes d'essais. Dans le but de visualiser l'impact des liens affirmatifs entre ces causes-familles et groupes connus sur les défauts-familles, les organigrammes de liaisons présentés à la fin du Chapitre 2 ont été développés jusqu'au niveau des groupes d'essais. Étant donné la complexité et l'étendue de ces arbres de liaisons, ils sont présentés à l'Annexe 2 du mémoire. Essentiellement, ils n'apportent pas beaucoup plus d'informations que le « Tableau synthèse permettant d'affirmer les familles de causes » déjà présenté. En effet, la complexité des liens de causalité entre les familles de défauts et celles des causes restreint la visualisation des liens interfamilles au niveau du regroupement seulement, au même titre que le Tableau V. Également, ils ne permettent pas d'ordonnancer les groupes d'essais qui doivent être entrepris. D'où la nécessité d'élaborer le Tableau VI présenté comme la « Matrice synthèse permettant d'affirmer les familles de causes ». Ce dernier expose sous forme de matrice la liste détaillée des résultats potentiels d'essais, complétés dans chacun des groupes, permettant l'affirmation d'une ou des causes comprises dans la cause-famille de la colonne respective.

Tableau 4.2

Tableau synthèse permettant d'affirmer les familles de causes

Causes Défauts	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
G1 - Observation visuelle	×	×	×	×	×	×
G2 - Historique du tronçon	×	×	Ø	×	×	×
G3 - Estimation du trafic	×	×	Ø	Ø	Ø	Ø
G4 - Essais non destructifs, incluant le type FWD	×	×	Ø	×	Ø	×
G5 - Carottage de la chaussée	Ø	×	Ø	Ø	Ø	×
G6 - Essais Laboratoire des Chaussées	×	×	×	×	Ø	×
G7 - Caractérisation et autres	Ø	×	×	×	Ø	×
G8 - Forage des couches de sol	Ø	Ø	×	×	Ø	Ø

Présence d'au moins un permettant d'affirmer la famille de causes : **X**Aucun essai permettant d'affirmer la famille de causes : **Ø**

Tableau 4.3

Matrice synthèse permettant d'affirmer les familles de causes

Défauts \ Causes	Causes					
	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
G1 - Observations visuelles	zone sollicitation accrue – adhérence et épaisseur des couches – usure du revêtement – oxydation du mélange	faiblesses ponctuelles – tassements – comportement gélif – déneigement	écoulement de surface de l'eau – infiltration de surface – efficacité du système de drainage – apport latéral en eau	remblai et/ou déblai – sol argileux ou marécageux – manque ou relâchement du support latéral – effet récurrent des cycles gel/dégel – niveau de la nappe phréatique	faible profondeur des conduites – mauvais état des services enfouis – diminution de la section de chaussée – déplacement du cadre – perte de matériaux – désagrégation de la cheminée – état de l'accès à la surface – impacts dynamiques	excès de liant d'accrochage – ségrégation à la pose – mauvais joint de construction – largeur de voie – manque de remblai – transition inadéquate
G2 - Historique du tronçon	épaisseur insuffisante et/ou changement de vocation – vieillissement du pavage	discontinuité de la structure et/ou étape de construction	S/O	secteur de remblai et/ou déblai – type de sol instable – gélivité du sol support	historique des interventions et/ou mauvais état des services enfouis	mauvaise méthode de compaction
G3 - Estimation du trafic	manque d'adhérence et/ou sous-dimensionnement de l'épaisseur des couches à cause du volume de trafic	capacité portante insuffisante due au trafic et/ou en période de dégel	S/O	S/O	S/O	S/O

Tableau 4.3

Matrice synthèse permettant d'affirmer les familles de causes

Causes Groupes	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
G4 - Essais non destructifs et du type « FWD »	sous-dimensionnement de l'épaisseur des couches et fatigue du revêtement	capacité portante insuffisante due au trafic et/ou en période de dégel – fatigue structurale	S/O	instabilité du remblai et vérification du Mr	S/O	manque de compaction de l'enrobé
G5 - Carottage de la chaussée	S/O	retrait thermique des matériaux – épaisseurs des couches de la structure	S/O	S/O	S/O	remontée de fissures transition inadéquate entre les matériaux
G6 - Essais LC	dosage du mélange – déficience en vide – angularité et type de granulats – mauvais enrobage – stabilité par temps chaud – retrait thermique et fragilisation du bitume	usure des matériaux – granulométrie	mouvement hydraulique et/ou affouillement – capillarité des couches granulaires	sensibilité à l'humidité des matériaux du sol	S/O	surchauffe du mélange lors de la pose
G7- Caractérisation et autres	S/O	hétérogénéité des couches de la structure	drainage des couches de la structure	gélivité du sol support	S/O	présence de matériaux inadéquats
G8 - Forage des couches de sol	S/O	S/O	assèchement du sol support	caractérisation des matériaux du sol	S/O	S/O

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION DE L'OUTIL

5.1 Présentation de l'outil de diagnostic

Les Chapitres 2, 3 et 4 ont exposé une multitude de liens causaux reliant les défauts, les causes et les essais applicables à une structure de chaussée flexible. Cependant, le nombre important de possibilités, qu'occasionne la vaste gamme de filiations interfamilles, demande une mécanique structurée pour faire ressortir rapidement la cause la plus probable.

Ce chapitre représente donc le noyau de ce mémoire, voué à l'élaboration d'un outil structuré qui permet de diagnostiquer la cause de détérioration d'une chaussée souple, quelle qu'elle soit : ses défauts de surface, la spécificité de ses matériaux ou de ses propriétés structurales, les caractéristiques de son sol support ou de son environnement, le trafic passé et futur, les changements climatiques subis et autres paramètres affectant le comportement d'une chaussée.

Comme décrit antérieurement, les causes-familles formées au Chapitre 3 sont considérées comme l'élément central de l'outil recherché. De plus, la mécanique rationnelle de l'outil doit assurer la validation des causes responsables de l'état de la chaussée, puisque la simple présence d'une cause n'implique pas automatiquement que celle-ci est responsable d'un défaut apparent au moment de l'analyse. Un tronçon de chaussée dégradée présente généralement plusieurs défauts de surface. Il a été établi au Chapitre 2 que chacun d'entre eux peut résulter d'une ou plusieurs causes cataloguées dans une des six causes-familles du Chapitre 3. En raison de la grande diversité des sources de dégradation, il est fondé de poser l'hypothèse que les défauts ne sont pas tous issus d'une même cause. Dans les faits, ces précisions conditionnent la mécanique de l'outil en ce sens qu'elle doit tenir compte d'au moins deux étapes dans l'analyse d'une section de chaussée : l'affirmation de la présence d'une cause potentiellement responsable du défaut et la validation de cette cause

comme la source du défaut qui a conduit au choix de l'essai par l'application de l'outil de diagnostic.

Pour poser un diagnostic ou suspecter qu'une cause est responsable, il est nécessaire de connaître les caractéristiques et les propriétés de la chaussée (Assaf, 2005). Or, ces informations ne sont pas toujours accessibles. Cela est d'autant plus vrai pour les couches sous-jacentes aux surfaces exposées. Pour obtenir ces informations, il est indispensable de réaliser des expertises dans plusieurs domaines pour qualifier, quantifier et évaluer les caractéristiques et les propriétés de la chaussée étudiée (Assaf, 2003). Elles permettront de mieux cerner et comprendre les mécanismes de dégradation en cours. En contrepartie, force est d'admettre qu'il est très coûteux, voire même problématique, de réaliser des essais sur une chaussée subissant un flot de trafic continu et important (Haas & Hudson, 1994). Il est donc nécessaire de choisir minutieusement les expertises les plus indiquées pour l'analyse du tronçon afin de connaître les lacunes de l'ensemble qui sont à l'origine des causes spécifiquement liées aux défauts observés (Assaf, 2003). Cette problématique de sélection des essais est décuplée, entre autres, lorsque la décrépidité globale du tronçon engendre l'accroissement de l'étendue et/ou de la sévérité de chacun des défauts (Assaf, 2005). Aussi, quoiqu'il puisse arriver que l'état général du tronçon ne soit pas dû nécessairement aux mêmes causes qui sous-tendent certaines des dégradations analysées, il demeure que l'état global de la chaussée est généralement indicateur d'une ou des cause(s) de détérioration possible(s) (MTQ, 2006). En raison de la présence simultanée de plusieurs causes, il ne faudra pas se limiter à une seule cause pour chaque défaut relevé (Assaf, 2003). Généralement, une route désuète qui présente des dégradations sévères et étendues est plus propice à confondre l'ingénieur dans le choix des essais à réaliser (Cook & Seeds, 2004). Donc, pour diagnostiquer efficacement la chaussée au moyen de l'utilisation de l'outil envisagé dans ce mémoire, ce dernier devra offrir une approche qui dirige le gestionnaire dans ses choix d'essais à réaliser pour l'affirmation des causes potentielles. Ceci dit, l'ingénierie étant ce qu'elle est, une mécanique rationnelle devra laisser une certaine latitude décisionnelle à l'ingénieur. Pour bénéficier des connaissances du gestionnaire opérateur de

l'outil, le fonctionnement du système devra permettre à l'utilisateur d'être sensible à toutes les étapes du diagnostic prodigué par l'application du système développé.

Les essais peuvent s'avérer dispendieux et dommageables pour la structure à analyser (Haas & Hudson, 1994). Pour éviter l'exécution d'essais inappropriés et/ou inefficaces, selon l'avancement de l'analyse, l'outil doit hiérarchiser l'ordonnancement idéal pour l'exécution des divers essais, comme discuté au Chapitre 4. Les essais incarnent une partie cruciale du diagnostic puisque l'affirmation des causes dépend de la pertinence des résultats extirpés par l'exécution de ceux-ci. Idéalement, l'information tirée de chacun des essais doit assurer un certain raffinement du niveau de précision des connaissances acquises (Assaf, 2003). Le but est de tendre vers une meilleure compréhension des mécanismes de détérioration oeuvrant dans la structure et ce, malgré un essai aux résultats non concluants en vue de l'affirmation d'une cause. Cette prérogative est considérée, puisque l'exécution des essais nécessite des efforts concrets qui engendrent une partie, plus ou moins importante selon la nature de l'essai, des frais associés à la réalisation de ce dernier (Assaf, 2005). Étant donné qu'une majorité des coûts défrayés pour l'analyse d'un tronçon découle de la réalisation d'essais au chantier ou en laboratoire, la mécanique de l'outil prévoit une utilisation judicieuse de chacun des essais choisis dans le but de rentabiliser, le plus possible, les résultats extraits. Cette mécanique est destinée à accumuler les informations pertinentes afin de renforcer le diagnostic.

Dans un esprit pratique, il est indéniable que l'outil doit appuyer son diagnostic préliminaire sur les défauts de surface relevés afin de cibler les essais les plus appropriés permettant de confirmer ou d'infirmer le diagnostic préliminaire quant à la cause la plus probable. En effet, force est de reconnaître que la présence de cette dernière n'est qu'hypothétique à ce stade de l'analyse. Il est donc probable que l'essai renvoie des résultats qui n'affirment pas la présence de la cause évaluée, parce qu'elle n'est pas à la base du mécanisme de détérioration qui engendre le défaut étudié. Ceci est dû à la définition même d'un essai, présenté au Chapitre 1 de ce mémoire, soit : un procédé d'évaluation qualitative, quantitative

ou typologique des caractéristiques et des propriétés physico-chimiques d'un échantillon de matériel sans être sûr du résultat. En conséquence, il n'est réellement « rentable » que s'il affirme la cause désirée et ce, malgré le fait que l'essai est tout à fait indiqué pour les besoins du diagnostic.

Sachant qu'une forte proportion des coûts engagés pour l'analyse du tronçon est destinée à la réalisation des essais, il est nécessaire de prévoir un système automatique qui tient compte de la possibilité que l'essai ne soit pas concluant. Le but de cette démarche est de réduire les frais de réalisation d'essais n'offrant pas de résultats significatifs pour accroître le niveau de connaissances de l'utilisateur de l'outil à propos des propriétés de la chaussée. Ceci ne doit pas se faire toutefois au détriment d'un bon diagnostic.

Cette approche pragmatique nous amène à considérer un autre volet de l'évaluation d'une chaussée grâce aux résultats d'essais. Une importante partie des coûts d'un essai découle des frais fixes engendrés par la réalisation de ce dernier, comme les déplacements sur les lieux ou la prise d'échantillons représentatifs par exemple. Dans le but de réduire ce type de frais, il est souhaitable de réaliser les essais qui demandent des frais fixes élevés dans l'optique d'évaluer l'ensemble des causes qu'ils permettent d'affirmer. L'exécution de manipulations communes à plusieurs essais permet de réduire les sommes défrayées pour la partie qui peut être jumelée à plusieurs essais d'un même groupe. Grâce aux regroupements d'essais selon leur fonctionnement, établis au Chapitre 4, une importante partie des frais fixes peut être répartie sur l'ensemble des essais d'un groupe. Il est donc plus efficient de réaliser tous les essais d'un groupe pertinent au renforcement du diagnostic avant de réaliser les essais du groupe suivant, en suivant la liste développée à l'Annexe 1. De cette façon, un essai qui rend des résultats non concluants pour le diagnostic des causes est moins onéreux pour l'organisme de gestion qui l'a conduit. Cet avantage est acquis grâce à la répartition des frais fixes avec d'autres essais du même groupe, qui n'ont toujours pas été réalisés et qui offrent encore la possibilité d'affirmer d'autres causes à affirmer ou infirmer. Cependant, afin de reconnaître l'ensemble de causes vérifiables par le groupe avant son

exécution, elles doivent toutes être reconnues et mises en évidence par la mécanique de l'outil. Il est donc indispensable que cette mécanique établisse l'ensemble des causes à affirmer et valider avant de débiter l'analyse de celles-ci grâce aux résultats provenant des essais recommandés par la méthode automatique. Étant donné que le fonctionnement de l'outil prévoit l'identification des causes par association entre les défauts-familles et les causes-familles, les dégradations de surface doivent être connues pour reconnaître la totalité des causes qui seront analysées pour permettre le choix des essais.

Le regroupement par famille des défauts et leur lien direct avec les causes-familles permet d'éliminer avantageusement les familles de causes qui n'ont pas de lien direct avec les défauts compris dans les défauts-familles impliqués, tel que décrit au Chapitre 3. Le désavantage de ces regroupements est que les défauts-familles ne permettent pas de clairement relier un symptôme aux causes spécifiquement associées à ce dernier. Pour pallier ce déficit de précision, le processus automatique de l'outil devra considérer que les causes-familles sont toutes potentiellement responsables du défaut-famille auquel le symptôme relevé fait partie.

L'argumentation présentée ci-haut élabore qu'il est économiquement avantageux de réaliser les essais par groupe et ce, en fonction de l'ordonnancement prescrit par l'outil. Étant donné que l'interprétation des résultats d'essais permet l'affirmation des causes et que celles-ci peuvent valider les défauts observés, la réalisation des essais est une action indispensable à exécuter par l'utilisateur de l'outil, ou par d'autres via des mandats octroyés par des organisations externes, pour rendre un diagnostic rigoureux d'une chaussée.

5.1.1 Organigramme du diagnostic par l'utilisation de l'outil

Cette partie de la présentation de l'outil est destinée à schématiser le fonctionnement de ce dernier afin d'illustrer, de morceler et de détailler les différentes étapes du diagnostic à prodiguer grâce à l'outil utilisé.

En effet, il est nécessaire que l'utilisateur de l'outil respecte chacune des étapes prévues pour assurer l'intégrité de l'analyse exécutée par le gestionnaire du tronçon. La Figure 5.1 présente un organigramme d'utilisation que l'analyste devra suivre rigoureusement durant le diagnostic. Cet organigramme schématise le cheminement des diverses étapes à réaliser avant de connaître les causes des défauts relevés sur le site. Également, l'organigramme présente le diagnostic en 4 étapes. Les étapes 2, 3 et 4 sont scindées en parties a) et b) pour souligner l'important changement dans l'approche que l'analyste doit suivre lors de l'exécution des essais destinés à l'affirmation de la dernière cause-famille pour chaque groupe d'essais.

Succinctement, il est possible de résumer l'organigramme comme suit : 1) relevé des défauts et familles de causes possibles à affirmer, 2a-b) réalisation des essais du groupe et cause à affirmer, 3a-b) cause valide le défaut, 4a) conservé la cause pour analyse future et reprendre les étapes 2) et 3), ou 4b) conservé la cause pour analyse future et remplacer le groupe dont les essais sont terminés par le groupe d'essais suivant, selon l'itinéraire prescrit par l'outil.

La méthode pour mettre en application l'organigramme sera discutée dans ce chapitre afin d'établir comment les tableaux 3.3 et 4.3 seront utilisés pour permettre au gestionnaire de répondre par OUI ou NON à chacune des 3 étapes charnières de l'outil de diagnostic. Le prochain chapitre sera dédié à la validation de l'outil présenté. Cette dernière portion du mémoire permettra au lecteur de comparer les résultats obtenus par l'application de l'outil par rapport à des résultats officiels et reconnus par la firme LVM Fondatec.

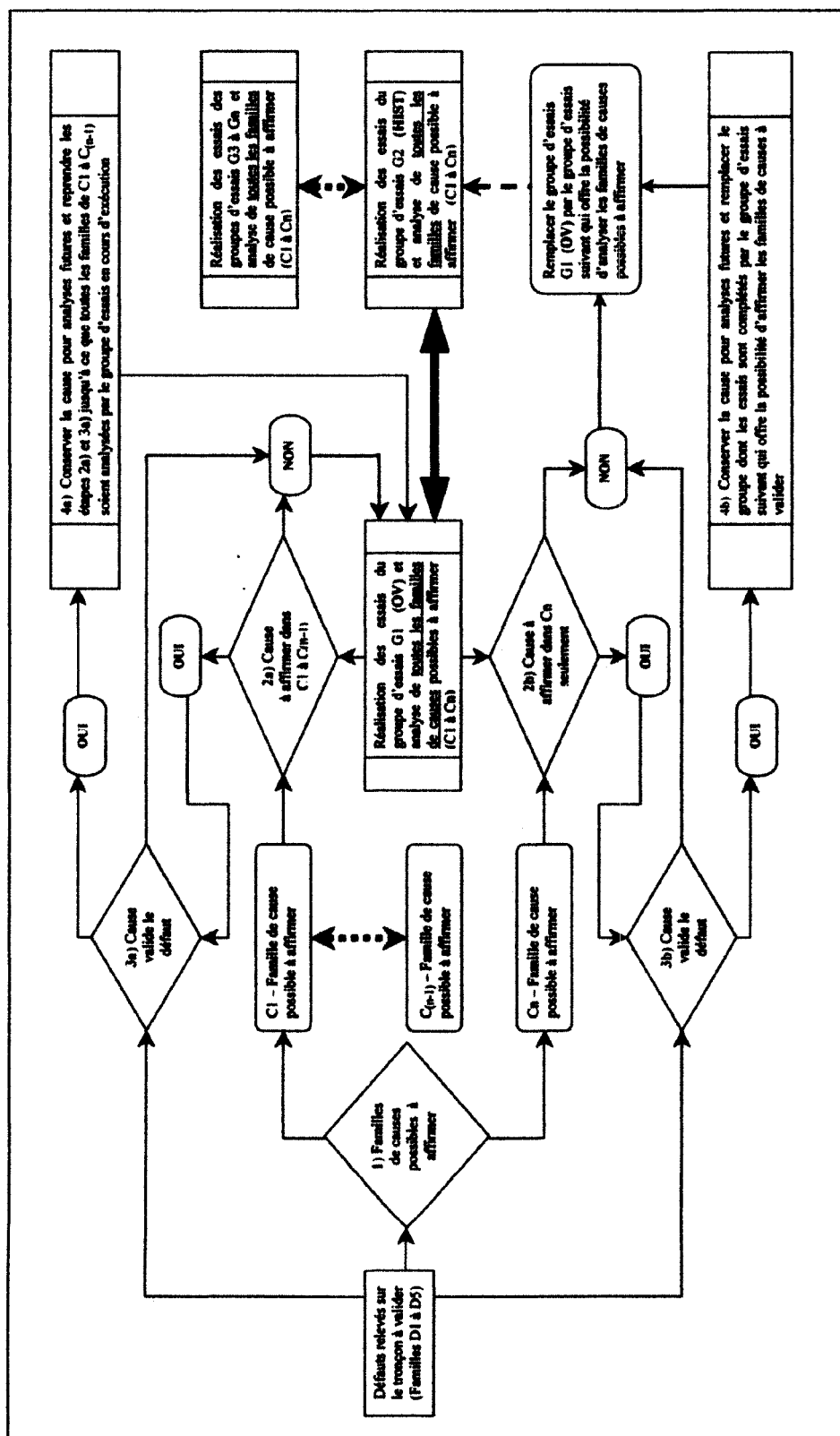


Figure 5.1 Organigramme du diagnostic d'une chaussée flexible par l'utilisation de l'outil.

5.1.2 Méthode d'application de l'organigramme

Cette section du chapitre est élaborée afin de décrire la méthode qui permet l'utilisation de l'organigramme présenté à la section précédente. Ce dernier expose le cheminement d'un diagnostic prodigué à partir des défauts de surface relevés sur la chaussée d'une structure flexible au moyen de l'outil présenté.

Avant de débiter l'analyse d'un tronçon, il est nécessaire de consigner les informations connues sous une forme descriptive afin de qualifier la chaussée à l'étude. Ces dernières doivent être à portée de main du gestionnaire qui réalise l'analyse à l'aide de l'outil. Ce mémoire ne prescrit ou n'impose aucune méthode de consignment de ces connaissances, puisqu'en soi, ces activités ne font pas partie du diagnostic de la chaussée analysée. De plus, elles ne s'inscrivent pas dans les objectifs prédéfinis qui encadrent l'élaboration de l'outil. Globalement, toutes les caractéristiques et spécificités connues de la route étudiée doivent comprendre, entre autres :

- ✓ les informations générales (entreprise, responsables, date, client et responsable, lieu, nom de la route, tronçon, période de l'année analysée, etc.);
- ✓ les caractéristiques du tronçon (type de route, rurale ou urbaine, direction de la circulation, type de trafic, nombre et largeur de voies, type de chaussée, longueur, géométrie générale, etc.);
- ✓ les défauts de surface relevés sur les lieux (Tessier, 1990).

Pour plus de pragmatisme et pour faciliter la lecture des résultats présentés dans ce mémoire, les symptômes relevés et inscrits dans une liste seront classifiés selon l'importance de chacun d'entre eux. Concrètement, les défauts sont subjectivement pondérés selon l'appréciation visuelle de leur étendue et de leur sévérité générale. La liste est triée en ordre décroissant, selon l'importance pondérée de chaque défaut par rapport à l'ensemble des défauts observés.

5.1.2.1 Étape 1) Familles de causes possibles à affirmer

Le diagnostic de la structure flexible débute à cette partie de l'analyse. Le sujet est connu et les symptômes sont qualifiés, voire quantifiés. L'utilisateur de l'outil est désormais en mesure de vérifier quelles familles de défauts doivent être validées afin de comprendre les problèmes internes de la structure souple.

Pour procéder à l'étape 1) de l'analyse, l'utilisateur de l'outil doit repérer dans les Figures 2.9 ou 2.10 du Chapitre 2 les défauts-familles qui contiennent les divers défauts relevés à la surface de la chaussée. Pour chaque symptôme relevé, une famille de défauts doit être consignée par l'analyste de façon à ce qu'il soit en mesure de rapidement visualiser quels défauts-familles ont été observés sur les lieux. Cette première partie de l'étape 1) est réalisée dans le but d'établir les familles de défauts impliquées dans l'analyse.

Grâce à cette liste de défauts-familles, l'utilisateur a désormais les moyens de reconnaître quelles familles de causes sont potentiellement responsables de la décrépidité du tronçon à l'étude, puisque le Tableau III du Chapitre 2 expose précisément quelles causes-familles peuvent être impliquées dans l'apparition des défauts compris dans chacun des cinq défauts-familles. En effet, la « Matrice synthèse des causes qui valident les défauts » décrit les causes comprises dans chaque cause-famille qui sont potentiellement responsables des défauts observés sur place. Il est important de préciser que l'utilisateur de l'outil doit posséder une copie du Tableau III pour mettre en évidence les défauts-familles consignés de façon à assurer un repérage rapide de ces derniers lors de l'exécution de l'étape 3a) ou 3b) du diagnostic réalisé à l'aide de l'outil.

5.1.2.2 Étape 2) Causes à affirmer

Cette étape de l'analyse est destinée à l'affirmation des causes comprises dans les causes-familles hypothétiquement impliquées dans la détérioration de la route étudiée. En effet,

l'étape précédente a permis de mettre en évidence les causes-familles possiblement responsables des défauts relevés. En utilisant le Tableau VI « Matrice synthèse permettant d'affirmer les familles de causes », l'analyste peut visualiser quels groupes d'essais offrent la possibilité d'affirmer les causes-familles mises en évidence à l'étape précédente.

Par la suite, le gestionnaire qui utilise l'outil pour diagnostiquer la route doit faire ressortir les groupes d'essais à réaliser pour assurer l'opération d'affirmation de toutes les familles de causes possiblement à l'origine des symptômes observés sur le site. Pour ce faire, il utilise le Tableau 4.3 afin de l'aider à visualiser les groupes d'essais impliqués dans l'analyse en cours. En raison des priorités admises et accordées à certains groupes d'essais lors de l'élaboration du Tableau 4.3, discutées préalablement dans les Chapitres 4 et 5 de ce mémoire, l'analyste doit prévoir l'exécution des groupes d'essais dans l'ordre chronologique prescrit par la numérotation des groupes présentés.

L'ordonnancement des essais à exécuter dans chacun des groupes doit tenir compte de certaines spécificités lorsque plusieurs d'entre eux peuvent être réalisés pour une même famille de causes, respectivement en ordre décroissant d'importance : disponibilité des essais et interprétation des résultats, coûts des essais, dommages à la structure de chaussée existante, obstructions à la circulation et autres contraintes. Étant donné que la rentabilité d'un essai passe par la pertinence de ses résultats, les essais choisis doivent favoriser la meilleure interprétation possible de ces derniers. L'Annexe 1 présente une liste des « Essais préconisés pour affirmer les causes potentielles ». Chacune des « causes à affirmer », inscrites dans la colonne de droite de cette annexe, a été intégrée à une des six causes-familles à affirmer, présentées au Tableau 4.3. Pour clarifier ce qui est considéré comme un choix judicieux dans le cadre de ce mémoire, l'exemple ci-dessous expose le cheminement type d'un choix d'essais plutôt qu'un autre .

Exemple : Le groupe d'essais G4 – Essais non destructifs et du type « FWD » – doit assurer l'affirmation des familles de causes : C1 – Enrobés bitumineux, C2 – Structures de chaussée

et C4 – Sol support. Dans ce cas, il serait judicieux d'utiliser un appareil de test qui fournira des informations qui permettront une analyse : du bassin de déflexion (voir Annexe 1, Évaluation de l'enrobé, C1-D), par calcul du nombre structural SN (voir Annexe 1, Évaluation de la structure, C2-A&B) et par l'estimation du module résilient M_r (voir Annexe 1, Évaluation du sol support, C4-A). Cette démarche pour le choix de l'essai assure que ce dernier permettra d'évaluer toutes les familles de causes à partir des résultats extirpés de ces essais non destructifs. Les essais seront plus rentables, puisqu'ils sont coûteux pour l'organisation qui les conduit et que chacune des familles nécessite des informations différentes pour permettre l'affirmation de leur cause respective.

Tel qu'illustré par l'organigramme de la Figure 5.1, il est primordial de réaliser tous les essais pertinents de chaque groupe avant de passer au groupe suivant de la « Liste des groupes d'essais ». L'analyste doit se conformer à cette méthode d'application de l'outil jusqu'à ce que toutes les causes-familles, qui peuvent être affirmées par le groupe en cours d'exécution, soient analysées par l'utilisateur grâce aux résultats des essais compris dans ce groupe. Schématiquement, la mise en application de cette directive est représentée par la direction vers laquelle les flèches sont orientées dans l'organigramme, suite à l'étape 3a) ou 3b), selon la cause-famille analysée.

En fonction de l'interprétation des résultats des tests, l'analyste renvoie la réponse OUI ou NON à l'affirmation des causes comprises dans la cause-famille analysée. Dans le cas où la réponse est OUI, ce dernier doit mettre en évidence la cause affirmée dans le Tableau 4.3 pour lui permettre de réaliser l'étape 3a) ou 3b). Advenant le cas où les résultats ne permettent pas l'affirmation des causes comprises dans la cause-famille étudiée, l'utilisateur de l'outil poursuit systématiquement l'analyse, comme prescrit par l'organigramme de la Figure 5.1. En effet, la non-affirmation d'une cause renvoie la réponse NON par les flèches de l'organigramme, ce qui conduit l'analyste à poursuivre le groupe d'essais en réalisation. Enfin, il est à préciser que lors de l'analyse de la dernière cause-famille par l'exécution d'un groupe, soit l'étape 2b) de l'organigramme, la réponse négative à l'affirmation d'une cause

renvoie l'analyste vers l'exécution du prochain groupe d'essais à réaliser. Ainsi, l'outil assure que l'utilisateur ait analysé l'ensemble des causes qui pouvaient être affirmées par ce groupe et que le moment est venu de passer au groupe suivant du Tableau 4.1.

Grâce à la direction indiquée par les flèches de l'organigramme, l'utilisateur est, à ce stade de l'analyse, dirigé par l'organigramme vers un changement de groupe d'essais. Ce changement est désormais nécessaire, puisque le groupe en cours d'exécution est complété et qu'il n'offre plus de possibilité d'affirmation pour les causes potentiellement responsables des défauts de surface relevés. L'utilisateur de l'outil est donc contraint à remplacer le groupe d'essais par le suivant, selon la liste du Tableau 4.1, pour reprendre l'analyse des causes à affirmer, soit l'étape 2a) illustrée dans l'organigramme.

Pour fins d'éclaircissement, il est à noter que seules les étapes 2b) et 4b) renvoient l'utilisateur vers un changement de groupe d'essais. Cette particularité est évidemment due au fait que la partie b) de ces deux étapes prescrit que les essais du groupe ont tous été menés à terme, avec des résultats probants ou pas, pour la dernière famille de causes qui pouvait être affirmée par ce groupe, inscrite sous l'appellation Cn dans la Figure 5.1.

5.1.2.3 Étape 3) Cause valide le défaut

L'étape de validation des défauts est cruciale pour assurer l'intégrité du diagnostic prodigué par l'utilisateur de l'outil. Dans le cas où les essais effectués renvoient des résultats qui permettent à l'analyste d'affirmer qu'une cause de la cause-famille étudiée est présente dans la structure flexible, il est primordial de valider la pertinence de celle-ci par rapport aux défauts de surface initialement relevés. L'affirmation d'une cause et la mise en évidence de cette dernière dans le Tableau 4.3 n'indiquent pas qu'elle est à l'origine des défauts observés à la surface de route. En effet, les étapes précédentes ne permettent que l'affirmation de sa présence dans le mécanisme de détérioration qui sous-tend la détérioration globale de la chaussée souple.

Pour qu'un gestionnaire soit en mesure de comprendre les problèmes internes qui ont engendré les défauts, il doit valider la pertinence des liens entre la cause affirmée et les défauts issus de la présence de cette dernière. Donc, les étapes 2) et 3) de l'« Organigramme du diagnostic d'une chaussée flexible par l'utilisation de l'outil » doivent être réalisées en série indivise pour chaque cause affirmée à l'étape 2a) ou 2b) du diagnostic. Cette méthode d'application de l'outil est prescrite dans le but de valider l'importance des causes affirmées dans l'apparition des symptômes durant la progression de l'analyse. Grâce à l'exécution de l'étape de validation en cours de diagnostic, l'utilisateur peut comprendre l'importance des causes affirmées au fur et à mesure que l'analyse progresse. Il est donc plus sensible à l'évolution du diagnostic. De cette façon, il est également mieux outillé pour détecter le meilleur moment d'arrêter l'analyse.

En utilisant la copie du Tableau 3.3 « Matrice synthèse des causes qui valident les défauts », sur laquelle l'analyste a mis en relief les défauts-familles impliqués dans le diagnostic, le gestionnaire qui utilise l'outil pourra valider si la cause affirmée est attribuable à un ou des défauts observés sur les lieux. En effet, cette matrice recense l'ensemble des causes qui sous-tendent l'apparition des défauts compris dans chacun des défauts-familles. Pour valider une cause affirmée, l'utilisateur n'a qu'à vérifier si cette dernière, inscrite dans la colonne de sa cause-famille respective, est citée dans une des lignes mises en évidence lors de l'étape 1) du diagnostic. Si tel est le cas, la cause valide un ou des défauts compris dans ce défaut-famille, puisqu'il est catalogué ainsi par la matrice de l'outil de diagnostic. Dans le cas contraire, la cause ne valide aucun défaut relevé sur les lieux et n'est donc pas directement responsable des dégradations initialement observées. Ce dernier résultat d'analyse est schématisé par les flèches de l'organigramme qui renvoient l'analyste à la réponse NON. En fonction de la cause-famille à l'étude à ce moment du diagnostic, l'utilisateur est contraint par la mécanique de l'outil à poursuivre le diagnostic par l'exécution des essais du groupe en cours de réalisation, ou à remplacer le groupe d'essais complété par le groupe suivant de la liste du Tableau 4.1.

Tel que représenté par l'organigramme du diagnostic, dans le cas où la cause affirmée valide le défaut observé, cette cause doit être consignée pour analyses futures. L'analyste doit la mettre en évidence sur la copie du Tableau 3.3 de façon à ce qu'il puisse rapidement retrouver les causes qui ont indubitablement contribué à la formation des symptômes compris dans le défaut-famille validé.

5.1.2.4 Étape 4) Conserver la cause pour analyses futures

Cette dernière section de la méthode relève plus de l'appréciation générale de la cause validée par rapport aux défauts compris dans ce défaut-famille que de l'application systématique de critères prédéterminés par l'outil. Après la validation d'un défaut par une cause affirmée, la poursuite de l'analyse implique des efforts supplémentaires pour assurer l'affirmation des autres causes possiblement présentes. Ces efforts supplémentaires engendrent invariablement des coûts, plus ou moins élevés, puisque des essais devront être conduits afin de poursuivre l'analyse. Dans le but de ne pas causer des frais superflus, l'outil prévoit une évaluation de l'importance des causes affirmées et validées par le gestionnaire qui réalise le diagnostic à l'aide de l'outil.

Dans les faits, l'outil conduit l'analyse de façon à ce que les essais soient réalisés par groupe. Ces tests sont généralement de même nature à l'intérieur d'un même ensemble. Tel qu'imposé par la mécanique de l'outil, un essai applicable à plusieurs causes-familles doit être conduit de façon à assurer l'affirmation de toutes les familles de causes, pour ensuite valider les défauts potentiellement associés à cette dernière, avant de remettre en question la poursuite de l'analyse des causes par l'exécution des étapes 2 et 3. Cette prérogative est globalement salubre pour le diagnostic au niveau monétaire, puisque généralement les coûts additionnels qui découlent des essais pour l'affirmation de toutes les causes-familles possibles seront minimales par rapport aux coûts globaux engendrés par l'exécution du groupe. Grâce à cette méthode, le gestionnaire s'assure d'avoir une meilleure

compréhension des mécanismes de dégradation enclenchés par les causes présentes. De plus, ces informations lui permettront de mieux asseoir son diagnostic.

Concrètement, l'action à poser par l'analyste à ce stade de l'étude est de se poser la question suivante : est-ce que les causes mises en évidence dans la matrice du Tableau 3.3 complètent l'analyse de façon satisfaisante ? La réponse réside dans l'importance des causes validées par rapport aux défauts relevés avant le début de l'analyse. En effet, le gestionnaire doit s'en remettre à ses connaissances personnelles, ou à celles d'autrui, pour juger si le diagnostic est complet et sans équivoque. Cette étape doit être réalisée par l'utilisateur, puisqu'en soi, l'outil a rempli son mandat à ce stade du diagnostic. En effet, il a méthodiquement amené le gestionnaire à diagnostiquer la chaussée étudiée par l'exécution d'essais appropriés afin de mettre en évidence les causes qui sous-tendent les défauts relevés sur les lieux.

Enfin, dans le cas où l'utilisateur croit que l'évaluation de la route doit être poursuivie, ce dernier procède à la réalisation du groupe d'essais suivant, tel que schématisé par l'organigramme du processus d'analyse. Dans le cas contraire, l'analyste croit fermement que les causes affirmées sont à l'origine des défauts observés initialement. Donc, le processus d'analyse est arrêté et les causes affirmées sont conservées pour de futures analyses. Évidemment, le but à moyen terme est d'utiliser les informations obtenues, grâce au diagnostic rendu, pour établir les méthodes de réhabilitation qui seront recommandées afin de corriger la structure analysée. Ultimement, ces modifications à la structure souple adresseront les mécanismes de détérioration enclenchés par la présence des causes consignées à la présente étape.

CHAPITRE 6

VALIDATION DE L'OUTIL

6.1 Description de la méthode

Ce chapitre est articulé autour de trois exemples de mise en application de l'outil développé dans ce mémoire. Cette première section est présentée pour clairement décrire la méthodologie des quatre étapes discutées dans le chapitre précédent, dans le but d'élaborer une preuve de validité de l'outil de diagnostic.

Également, des moyens additionnels de démonstration sont ajoutés à la méthode d'application pour réaliser ces trois exercices, afin de clarifier la méthodologie prescrite à la Figure 5.1. Ces exemples d'analyses sont présentés de telle sorte que chacune des étapes soit visuellement reconnaissable pour l'éventuel utilisateur de l'outil.

Les moyens utilisés pour permettre la reconnaissance des étapes sont les suivants :

Étape 1) Familles de causes possibles à affirmer : Tel que prescrit, une copie du Tableau 3.3 est utilisée pour mettre en évidence les défauts-familles impliqués dans le diagnostic de façon à reconnaître les causes-familles à analyser. Les familles concernées sont mises en évidence grâce à leur texte de couleur rouge.

Étape 2) Causes à affirmer : Comme prévu dans la description de l'outil, le Tableau 4.3 est utilisé pour déterminer quels groupes d'essais offrent la possibilité d'affirmer les causes comprises dans chaque cause-famille qui seront analysées par l'utilisateur. Les cases des groupes d'essais ont été colorées pour différencier chacun des groupes d'essais permettant d'affirmer la cause, grâce aux résultats obtenus, et qui sera validée à l'étape suivante. Finalement, les causes affirmées à cette étape du diagnostic sont mises en valeur par leur texte de couleur bleue dans le Tableau 4.3.

Étape 3) Cause valide le défaut : Tel que mentionné, la copie du Tableau 3.3, qui a déjà été utilisée lors de l'exécution de l'étape 1), sert de base visuelle pour reconnaître les familles de causes et de défauts à considérer dans l'analyse. Pour réaliser la présente étape, l'utilisateur met en valeur les causes affirmées, celles de couleur bleue exposées au Tableau 4.3, en modifiant la couleur du texte en bleu dans le Tableau 3.3.

Dans le but précis d'établir un lien visuel entre le groupe qui a permis d'affirmer la cause et celle qui a été modifiée en bleu dans le Tableau 3.3, l'étape de validation est représentée par une flèche dont la couleur fait référence à la couleur du groupe qui a permis son affirmation. Aussi, il est à noter que certaines causes du Tableau 4.3 ne sont pas inscrites sous la même appellation dans le Tableau 3.3. Ces modifications ont été retenues en raison du type d'analyse qui est conduit dans chacun des deux tableaux : le premier tente d'affirmer une cause grâce aux résultats, alors que l'autre valide un défaut compris dans un des cinq défauts-familles. Les termes utilisés pour la description d'une même cause varient d'un tableau à l'autre. Ces modifications sont nécessaires pour que les liens de validation des défauts soient facilement reconnaissables par l'analyste qui réalise l'étape 4) du diagnostic. Par contre, rappelons que l'analogie terminologique a été décrite lors de la présentation des principes de dégradation qui relient les défauts et les causes, présentés aux Chapitres 2 et 3 de ce mémoire.

Étape 4) Conserver la cause pour analyses futures : Les méthodes qui peuvent être utilisées par l'utilisateur de l'outil pour mémoriser les causes affirmées et validées n'ont pas été adressées dans ce mémoire, puisqu'elles ne font pas partie des objectifs de ce dernier. Par contre, il est nécessaire d'exposer clairement l'importance des liens de validation entre les défauts relevés et les causes qui sous-tendent l'apparition de ceux-ci. Pour compléter cette partie de l'exécution des exemples, un tableau de consignation a tout de même été élaboré afin de compléter la démonstration réalisée grâce à ces exemples pratiques.

Finalement, les résultats de chacun des exemples seront sommairement comparés à ceux reconnus par le diagnostic des ingénieurs routiers de la firme LVM-Fondatec, puisque les exemples ci-dessous sont basés sur les informations tirées de cas réels, sur lesquels des études de réhabilitation de chaussée ont été menées en 2004 et en 2005.

6.2 Exemples de validation

La présente section se veut une mise en application de l'outil développé. Elle est cruciale pour l'appréciation de l'outil élaboré par le gestionnaire qui désire visualiser la méthodologie développée et les résultats obtenus dans un cadre comparatif des études réellement conduites par des experts en génie routier.

6.2.1 Premier exemple de validation

Caractéristiques des tronçons : Ville de Blainville, rue Lamothe – entre 30^e Avenue et 35^e Avenue – et rue Lucien-Paquette – entre la 30^e Avenue et la 35^e Avenue – (longueur totale de 1000 mètres) :

- ✓ rues locales et résidentielles;
- ✓ trafic lourd faible (livraison locale seulement);
- ✓ trafic estimé à moins de 2 000 ECAS / année;
- ✓ direction Nord-Sud en chaussée commune;
- ✓ cours d'eau formé de la rencontre des terrasses existantes avec le bord de pavage de la chaussée;
- ✓ une (1) voie de circulation dans chaque direction;
- ✓ possibilité de stationnement dans une direction à la fois;
- ✓ voies d'une largeur de 4,5 mètres.

Historique connu : La construction de ces rues a été réalisée durant la période d'après-guerre (1960). Aucune intervention majeure n'a été réalisée depuis cette période. Certaines sections du revêtement original ont été remplacées sur toute la largeur de la chaussée.

Plusieurs réparations locales sont notées sur toute la surface analysée. Celles-ci semblent avoir été réalisées selon les besoins locaux de réparation afin de ramener le niveau de confort au roulement à un niveau adéquat aux résidents.



Photo N° 1. Rue Lamothe



Photo N° 2. Rue Lamothe

Figure 6.1 Photos n^{os} 1 et 2 de la rue Lamothe, Blainville. (LVM-Fondatec, 2004)



Photo N° 5. Rue Lucien-Paquette



Figure 6.2 Photos n^{os} 5 et 6 de la rue Lucien-Paquette, Blainville. (LVM-Fondatec, 2004)



Photo N° 7. Rue Lucien-Paquette



Photo N° 8. Rue Lucien-Paquette

Figure 6.3 Photos n^{os} 7 et 8 de la rue Lucien-Paquette, Blainville.
(LVM-Fondatec, 2004)

Défauts observés : Ces défauts sont présentés en ordre décroissant d'importance, les uns par rapport aux autres, tel que recommandé au chapitre précédent :

- ✓ 1) fissures en mailles et carrelage – environ 50 % de la surface du tronçon présente ce type de fissuration. L'étendue de ces défauts semble provenir des sections en dépression du revêtement existant ainsi que de certaines fissures transversales. L'ouverture de ces fissures est inférieure à 5 mm.
- ✓ 2) arrachement des granulats – l'enrobé présente des signes marqués d'arrachement des granulats dans le mélange d'origine. Dégradation plus présente dans les secteurs où les fissures en maille sont moins importantes.
- ✓ 3) fissures longitudinales et lézardes – généralement positionnées au centre de la section transversale de la chaussée. L'ouverture de ces fissures varie généralement de 5 à 10 mm.
- ✓ 4) dépressions locales – concentrées dans les secteurs où il ne semble pas y avoir de drainage de surface, mais aussi à tout endroit de la surface du tronçon. Notez que le système de drainage de surface existant n'est pas conforme aux normes actuellement applicables.
- ✓ 5) réparations locales – réalisées sporadiquement selon les besoins immédiats, elles sont de formes géométriques variées et de multiples tailles. Elles semblent toutes avoir été réalisées en surface de la structure et à différentes périodes.

Figure 6.4 Utilisation du Tableau 3.3 pour le premier exemple de validation.

Tableau 3.3

Causes impliquées Défauts impliqués	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
D1 – Fissures transversales / maillles / carrelages	retrait thermique – rupture de fatigue – oxydation et vieillessement	retrait thermique des couches granulaires – consolidation et tassement	mouvement hydraulique du sol support	S/O	diminution de la section du revêtement	remontée de fissures – surchauffe du mélange
D2 – Fissures longitudinales	S/O	manque de portance en période de dégel – granulométrie – retrait thermique des couches granulaires – pénétration différentielle du gel	apport en eau latéralement – gel de l'eau dans la structure – mauvais drainage interne et/ou du système de drainage	sol support gélif – tassement et/ou glissement de terrain – instabilité latérale	S/O	largeur de voie trop étroite – mouvement vertical issu d'un manque de compaction – mauvaise construction d'un joint longitudinal – ségrégation à la nose
D3 – Défauts du revêtement	rupture de fatigue – oxydation et vieillessement – dosage du bitume – séparation des granulats par l'eau – défiance en vide – épaisseur insuffisante d'une couche – manque d'adhérence à l'interface	faiblesse ponctuelle manque de portance en période de dégel	infiltration de surface – apport latéral et /ou souterrain en eau – suction de l'eau vers la structure – mauvais drainage interne – gel de l'eau interne	S/O	S/O	excès de liant d'accrochage – mauvaise méthode de resurfage – ségrégation à la pose

Figure 6.5 Utilisation du Tableau 3.3 (suite) pour le premier exemple de validation.

Tableau 3.3 (suite)

Causes impliquées Défauts impliqués	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mises en œuvre
D4 - Défauts et fissuration dans les pistes de roues	angularité des granulats – rupture de fatigue – usure du mélange – stabilité et dosage du bitume – zone sollicitation accrue – manque d'adhérence à l'interface	manque de capacité structurale – manque de portance en période de dégel – pénétration différentielle du gel – fatigue et/ou usure structurale	manque de drainage des couches de la structure ou de la surface	S/O	S/O	mouvement vertical issu d'un manque de compaction – mauvaise mise en place et/ou compaction du mélange – mauvaise construction d'un joint longitudinal
D5 - Désordre du profil						

Figure 6.6 Utilisation du Tableau 4.3 pour le premier exemple de validation.

Tableau 4.3

Groupes	Causes impliquées					
	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
	zone sollicitation accrue – adhérence et épaisseur des couches – usure du revêtement – oxydation du mélange	faiblesses ponctuelles – tassements – comportement gélif – déneigement	écoulement de surface de l'eau – infiltration de surface – efficacité du système de drainage – apport latéral en eau	remblai et/ou déblai – sol argileux ou marécageux – tassement et/ou relâchement du support latéral – effet récurrent des cycles gel/dégel – niveau de la nappe phréatique	faible profondeur des conduites – mauvais état des services enfouis – diminution de la section de chaussée – déplacement du cadre – perte de matériaux – désagrégation de la cheminée – état de l'accès à la surface – impacts dynamiques	excès de liant d'accrochage – ségrégation à la pose – mauvais joint de construction – largeur de voie – manque de remblai – transition inadéquate
	épaisseur insuffisante et/ou changement de vocation – vieillissement du pavage	discontinuité de la structure et/ou étape de construction	S/O	secteur de remblai et/ou déblai – type de sol instable – gélivité du sol support	historique des interventions et/ou mauvais état des services enfouis	mauvaise méthode de compaction
G3 - Dimensionnement du trafic	manque d'adhérence et/ou sous-dimensionnement de l'épaisseur des couches à cause du volume de trafic	capacité portante insuffisante due au trafic et/ou en période de dégel	S/O	S/O	S/O	S/O

Figure 6.7 Utilisation du Tableau 4.3(suite) pour le premier exemple de validation.

Tableau 4.3 (suite)

Causes Défauts	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
G4 - Essai de traction-compression - type 1 (S/O)	sous-dimensionnement de l'épaisseur des couches et fatigue du revêtement	capacité portante insuffisante due au trafic et/ou en période de dégel - fatigue structurale	S/O	instabilité du remblai et vérification du Mr	S/O	manque de compaction de l'enrobé
G5 - Carottage de la chaussée	S/O	retrait thermique des matériaux - épaisseurs des couches de la structure	S/O	S/O	S/O	remontée de fissures - transition inadéquate entre les matériaux
	dosage du mélange - déficience en vide - angularité et type de granulats - mauvais enrobage - stabilité par temps chaud - retrait thermique et fragilisation du bitume	usure des matériaux - granulométrie	mouvement hydraulique et/ou affouillement - capillarité des couches granulaires	sensibilité à l'humidité des matériaux du sol	S/O	surchauffe du mélange lors de la pose
	S/O	hétérogénéité des couches de la structure	drainage des couches de la structure	gélivité du sol support	S/O	présence de matériaux inadéquats
	S/O	S/O	assèchement du sol support	caractérisation des matériaux du sol	S/O	S/O

Tableau 6.1

Étape 4) Consignation des informations du premier exemple

Défauts relevés initialement	Cause affirmée qui valide le défaut observé	Importance relative de cette cause dans le mécanisme de détérioration
Fissures en mailles et carrelages (famille D1)	1-oxydation et vieillissement du mélange, 2-tassements	<u>1-très important</u> ; 2-peu important
Arrachement des granulats (famille D3)	1-oxydation et vieillissement ; 2-manque de portance au dégel; 3-infiltration d'eau dans les fissures de surface; 4-succion de l'eau dans la structure; 5-mauvais drainage interne	<u>1-très important</u> ; 2-peu important; 3-important; 4-peu important; 5-peu important
Fissures longitudinales et lézardes (famille D2)	1-manque de portance en période de dégel; 2- pénétration différentielle du gel; 3-mauvais drainage interne et/ou du système de drainage; 4-sol support gélif; 5-mauvais joint de construction; 6-ségrégation à la pose	1-important; <u>2-très important</u> ; <u>3-très important</u> ; <u>4-très important</u> ; 5-peu important; 6-peu important
Dépressions locales (famille D5)	1-manque de portance en période de dégel; 2-Infiltration de surface; 3-succion de l'eau vers la structure; 4-gel de l'eau dans la structure; 5-tassements; 6-effet récurrent des cycles de gel et de dégel	1-important; 2-important; 3-peu important; 4-important; <u>5-très important</u> ; <u>6-très important</u>

Le rapport de LVM-Fondatec de juin 2004 résume les causes des défauts de surface relevés sur les lieux comme suit :

« Ces types de dégradation semblent principalement attribuables à des matériaux d'infrastructure gélifs et à un mauvais système de drainage de la chaussée occasionnant un problème de portance en période de dégel et un problème de soulèvement en période de gel ». (LVM-Fondatec, 2004, 8 p.)

Une analyse succincte des causes listées dans le tableau ci-dessus démontre que les causes les plus importantes qui sous-tendent les défauts relevés sont :

- oxydation et vieillissement
- effets des cycles de gel et dégel
- problème de drainage de surface et/ou interne
- tassements

Ce premier exemple de validation de l'outil confirme que le diagnostic rendu par l'utilisateur, qui repose son analyse sur l'outil présenté, confirme les causes incluses dans les conclusions tirées de l'ingénieur routier, qui a basé son analyse sur ses propres connaissances et compétences techniques. En effet, toutes les causes de la liste ci-dessus contribuent au mécanisme de détérioration décrit par la firme de génie qui a diagnostiqué les tronçons utilisés pour cette première étape de validation.

6.2.2 Deuxième exemple de validation

Caractéristiques du tronçon : Rang Lepage Ouest, Ville de Sainte-Anne-des-Plaines – entre la limite de la ville de Mirabel et la route 335 – (longueur d'environ 3200 mètres) :

- ✓ route collectrice et rurale;
- ✓ trafic estimé DJMA = 4500;
- ✓ trafic lourd = 5,5 %;
- ✓ direction Est-Ouest en chaussée commune;
- ✓ une (1) voie de circulation dans chaque direction;
- ✓ voies d'une largeur de 3,0 mètres;
- ✓ accotement d'une largeur moyenne de 300 mm;
- ✓ fossés de drainage latéral sur tout le tronçon;
- ✓ présence d'une douzaine de ponceaux sous la chaussée.

Historique connu : La période de construction de ce rang est inconnue. Cependant, la ville a été colonisée à partir du rang Lepage à la fin du 18^e siècle. Ce fait nous porte à croire que le rang fut un des premiers à être pavé. Le réseau électrique a été déployé entre 1925 et 1940, il est donc probable que le revêtement bitumineux ait été initialement mis en place durant cette période d'industrialisation. L'observation des couches de la structure révèle également que le revêtement de surface repose sur un lit de pierres concassées du type MG-20 d'environ 100 mm d'épaisseur. Cette couche de fondation est assise sur une couche qui s'apparente à un enrobé bitumineux. Le béton bitumineux actuel a dû être mis en place entre 1970 et 1980, puisque la croissance démographique fut très élevée durant cette période. Donc, on pose l'hypothèse que la structure de ce tronçon n'a pas été modifiée de façon significative depuis plus de 25 ans.

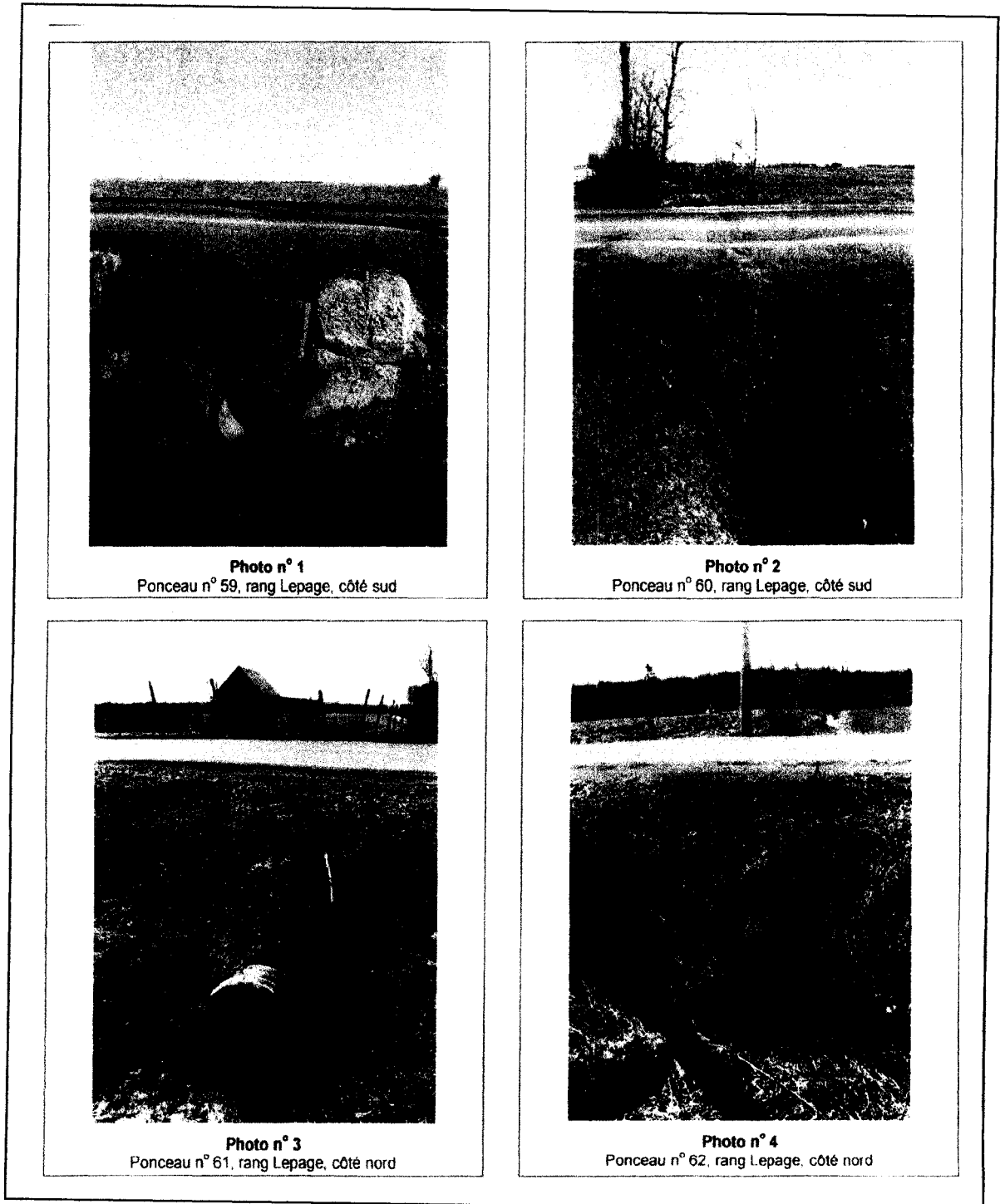


Figure 6.8 Photos n° 1 à 4 du rang Lepage, Sainte-Anne-des-Plaines.
(LVM-Fondatec, 2005)



Photo n° 5
Ponceau n° 63, rang Lepage, côté sud

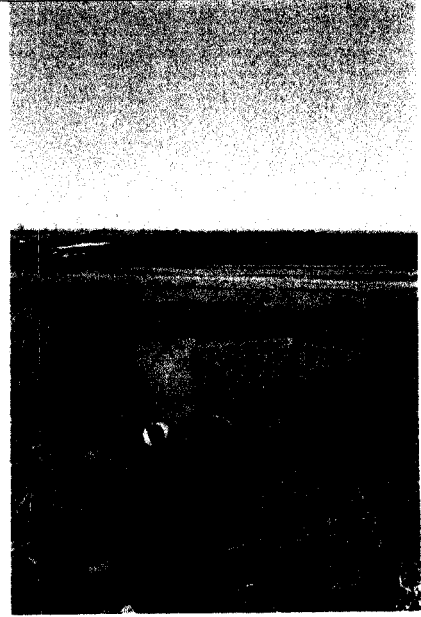


Photo n° 6
Ponceau n° 64, rang Lepage, côté sud



Photo n° 7
Ponceau n° 65, rang Lepage, côté nord



Photo n° 8
Ponceau n° 66, rang Lepage, côté sud

Figure 6.9 Photos n° 5 à 8 du rang Lepage, Sainte-Anne-des-Plaines.

(LVM-Fondatec, 2005)

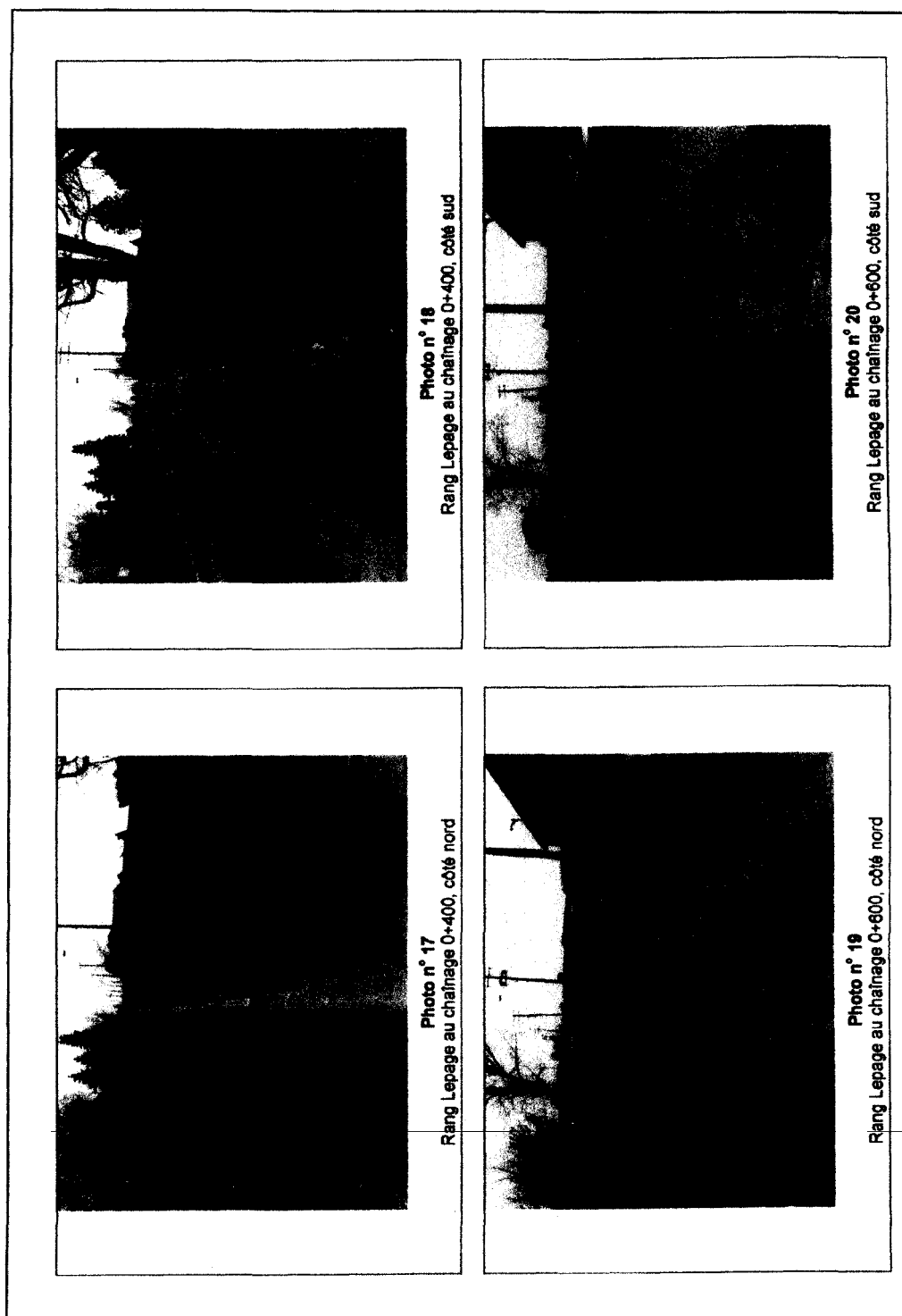


Figure 6.10 Photos n^{os} 17 à 20 du rang Lepage, Sainte-Anne-des-Plaines.

(LVM-Fondatec, 2005)

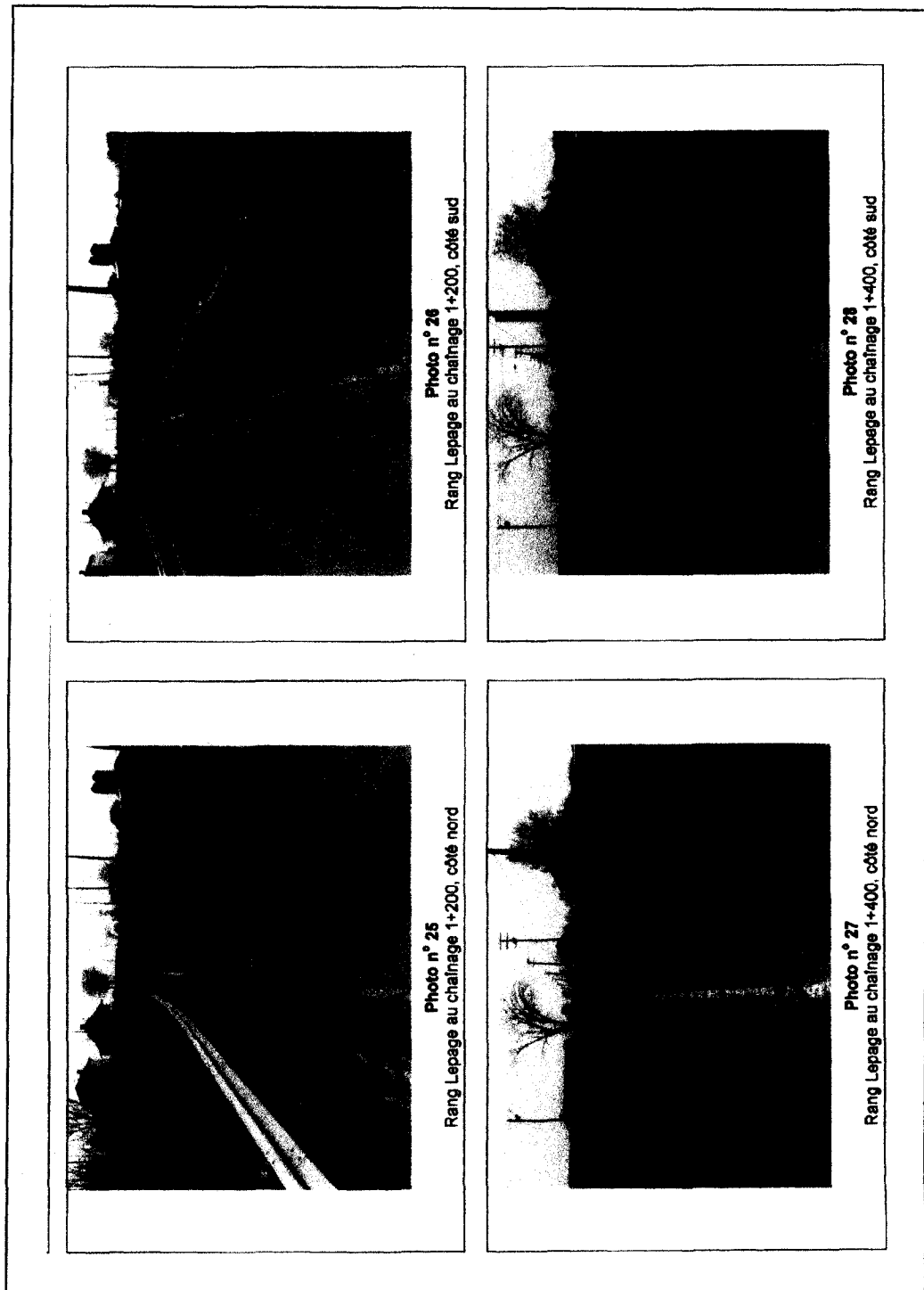


Figure 6.11 *Photos n° 25 à 28 du rang Lepage, Sainte-Anne-des-Plaines.*
(LVM-Fondatec, 2005)

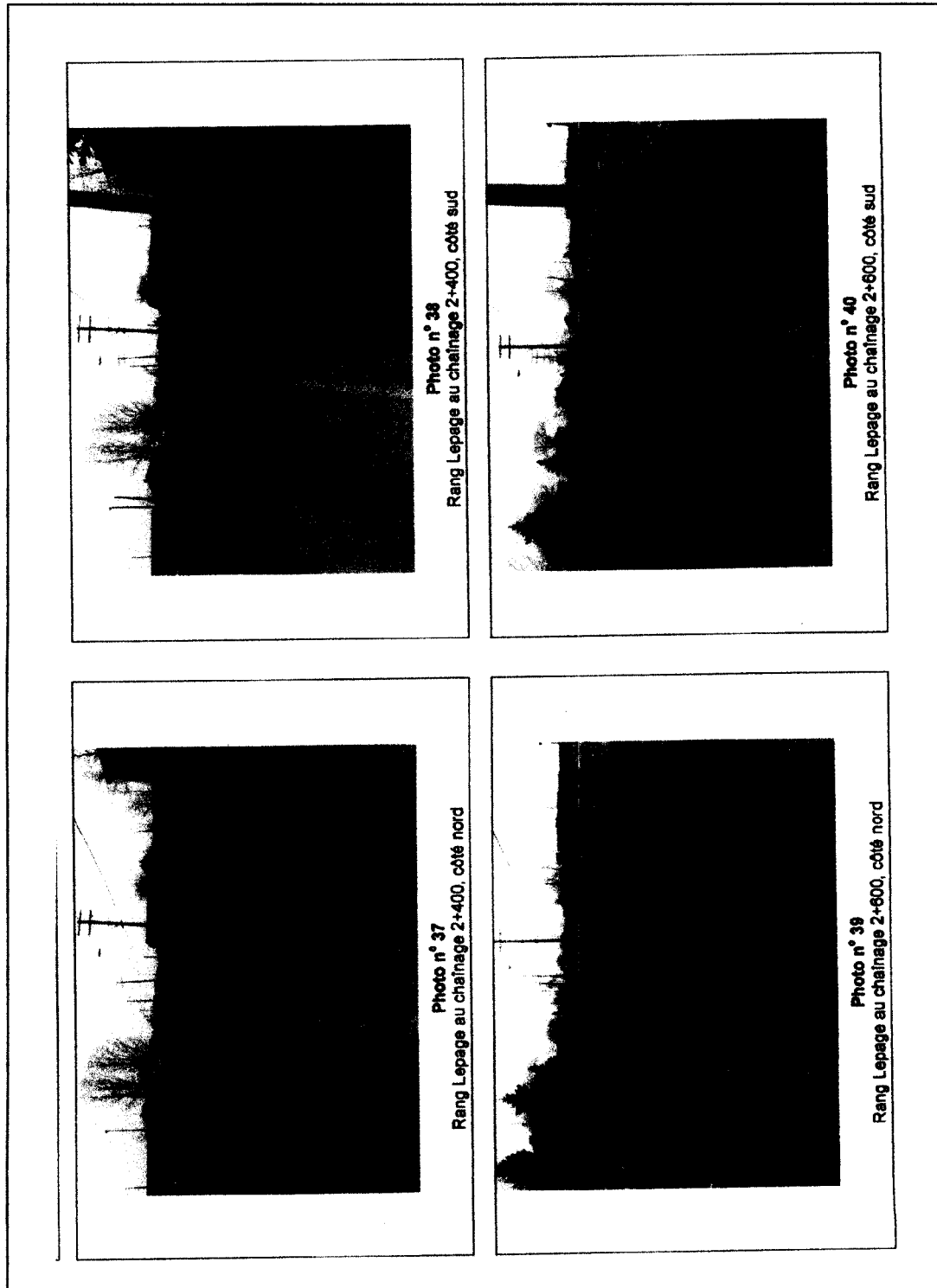


Figure 6.12 Photos n^{os} 37 à 40 du rang Lepage, Sainte-Anne-des-Plaines.

(LVM-Fondatec, 2005)

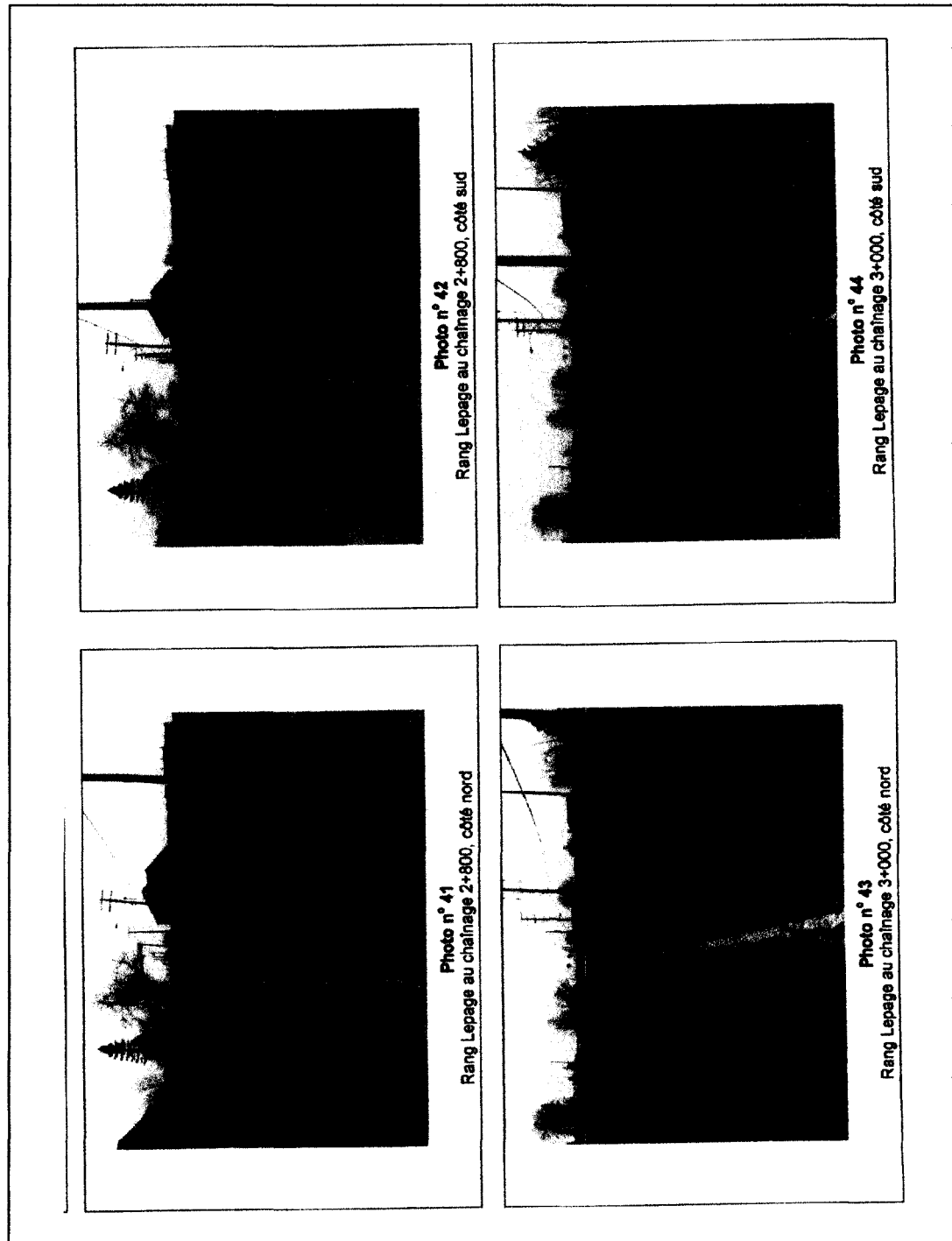


Figure 6.13 Photos n° 41 à 44 du rang Lepage, Sainte-Anne-des-Plaines.

(LVM-Fondatec, 2005)

Défauts observés : Ces défauts sont présentés en ordre décroissant :

- ✓ 1) fissures longitudinales – situées surtout en rive du pavage, elles sont accompagnées d'affaissement en bordure du pavage et présentent une ouverture importante dans la plupart des cas (elles sont également situées dans le centre de la chaussée, mais dans une moindre proportion, entre les deux voies de circulation);
- ✓ 2) fissures dans les pistes de roues – présentes dans certains secteurs du tronçon étudié, il semble que leur présence soit plus marquée lorsque les fossés de drainage sont moins profonds (l'ouverture de ces fissures présente une dégradation avancée);
- ✓ 3) ornières à grand rayon – l'affaissement varie entre les secteurs, l'ornière située près du bord de pavage est plus profonde que celle près du centre de la chaussée dans une proportion de 75 %;
- ✓ 4) affaissement latéral de chaussée – toujours accompagné d'une fissure en rive, sa superficie comprend la surface située entre la piste de roue et le bord de pavage, ces tassements ne semblent coordonnés avec le manque de la profondeur des fossés, malgré une déficience de profondeur à plusieurs endroits;
- ✓ 5) fissures en mailles et carrelage – ces réseaux de fissuration semblent prendre naissance à partir des fissures longitudinales de rive et s'étendent vers les fissures dans les traces de roues, cette observation est basée sur le fait que l'ouverture de ces mailles est de moindre importance que celle des autres réseaux de fissures;
- ✓ 6) dépressions locales – situées au-dessus des ponceaux existants ou aux endroits où des travaux de coupe et de tranchée ont été réalisés. Ces dépressions s'étendent généralement sur toute la largeur d'une voie, et souvent sur toute la largeur de la chaussée.

Figure 6.14 Utilisation du Tableau 3.3 pour le deuxième exemple de validation.

Tableau 3.3

Causes impliquées Défauts impliqués	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
D1 – Fissures transversales / mailles / carrelages	retrait thermique – rupture de fatigue – oxydation et vieillessement	retrait thermique des couches granulaires – consolidation et tassement	mouvement hydraulique du sol support	S/O	diminution de la section du revêtement	remontée de fissures – surchauffe du mélange
D2 – Fissures longitudinales	S/O	manque de portance en période de dégel – granulométrie – retrait thermique des couches granulaires – pénétration différentielle du gel	apport en eau latéral – gel de l'eau dans la structure – mauvais drainage interne et/ou du système de drainage	sol support gélif – tassement et/ou glissement de terrain – instabilité latérale	S/O	largeur de voie trop étroite – mouvement vertical issu d'un manque de compaction – mauvaise construction d'un joint longitudinal – ségrégation à la pose
D3 – Défauts du revêtement	rupture de fatigue – oxydation et vieillessement – dosage du bitume – séparation des granulats par l'eau – défiance en vide – épaisseur insuffisante d'une couche – manque d'adhérence à l'interface	faiblesse ponctuelle – manque de portance en période de dégel	infiltration de surface – apport latéral et /ou souterrain en eau – suction de l'eau vers la structure – mauvais drainage interne – gel de l'eau interne	S/O	S/O	excès de liant d'accrochage – mauvaise méthode de resurfacement – ségrégation à la pose

Figure 6.15 Utilisation du Tableau 3.3(suite) pour le deuxième exemple de validation.

Tableau 3.3 (suite)

Causes impliquées Défauts impliqués	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
D4 – Défauts et fissuration dans les pistes de roues	angularité des granulats – rupture de fatigue – usure du mélange – stabilité et dosage du bitume – zone de sollicitation accrue – manque d'adhérence à l'interface	manque de capacité structurale – manque de portance en période de dégel – pénétration différentielle du gel – fatigue et/ou usure structurale	manque de drainage des couches de la structure ou de la surface	S/O	S/O	mouvement vertical issu d'un manque de compaction – mauvaise mise en place et/ou compaction du mélange – mauvaise construction d'un joint longitudinal
D5 – Désordre du profil	S/O	hétérogénéité des matériaux – manque de portance en période de dégel	infiltration de surface – apport latéral et /ou souterrain en eau – suction de l'eau vers la structure de l'eau dans la structure	remblai et déblai instables – tassement et/ou glissement de terrain instabilité latérale effets récurrents des cycles de gel et dégel – nappe phréatique élevée	désagrégation de l'accès par la saumure – perte de matériaux autour de l'accès – impact dynamique et déplacement du cadre de l'accès – rupture et/ou faible profondeur d'une structure souterraine	mouvement vertical issu d'un manque de compaction – mauvaise transition de construction

Figure 6.16 Utilisation du Tableau 4.3 pour le deuxième exemple de validation.

Tableau 4.3

Groupes	Causes impliquées					
	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
	zone sollicitation accrue – adhérence et épaisseur des couches – usure du revêtement – oxydation du mélange	faiblesses ponctuelles – tassements – comportement gélif – déneigement	écoulement de surface de l'eau – infiltration de surface – efficacité du système de drainage – apport latéral en eau	remblai et/ou déblai – sol argileux ou marécageux – tassement et/ou relâchement du support latéral – effet récurrent des cycles gel/dégel – niveau de la nappe phréatique	faible profondeur des conduites – mauvais état des services enfouis – diminution de la section de chaussée – déplacement du cadre – perte de matériaux – désagrégation de la cheminée – état de l'accès à la surface – impacts dynamiques	excès de liant d'accrochage – ségrégation à la pose – mauvais joint de construction – largeur de voie – manque de remblai – transition inadéquate
	épaisseur insuffisante et/ou changement de vocation – vieillissement du pavage	discontinuité de la structure et/ou étape de construction	S/O	secteur de remblai et/ou déblai – type de sol instable – gélivité du sol support	historique des interventions et/ou mauvais état des services enfouis	mauvaise méthode de compaction
G3 - Estimation du trafic	manque d'adhérence et/ou sous-dimensionnement de l'épaisseur des couches à cause du volume de trafic	capacité portante À VÉRIFIER au trafic et/ou en période de dégel	S/O	S/O	S/O	S/O

Figure 6.17 Utilisation du Tableau 4.3 (suite) pour le deuxième exemple de validation

Tableau 4.3 (suite)

Causes Défauts	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
C4 - Fissures longitudinales et transversales de type « FFWI »	sous-dimensionnement de couches et fatigue du revêtement À VÉRIFIER	capacité portante insuffisante due au période de dégel – fatigue structurale À VÉRIFIER	S/O	À VÉRIFIER	S/O	manque de l'enrobé À VÉRIFIER
G5 - Carottage de la chaussée	S/O	retrait thermique des matériaux – épaisseurs des couches de la structure	S/O	S/O	S/O	remontée de fissures transition inadéquate entre les matériaux
	dosage du mélange – déficience en vide – angularité et type de granulats – mauvais enrobage – stabilité par temps chaud – retrait thermique et fragilisation du bitume	usure des matériaux – granulométrie	mouvement hydraulique et/ou affouillement – capillarité des couches granulaires	sensibilité à l'humidité des matériaux du sol	S/O	surchauffe du mélange lors de la pose
	S/O	hétérogénéité des couches de la structure	drainage des couches de la structure	gélivité du sol support	S/O	présence de matériaux inadéquats
	S/O	S/O	assèchement du sol support	caractérisation des matériaux du sol	S/O	S/O

Tableau 6.2

Étape 4) Consignation des informations du deuxième exemple

Défauts relevés initialement	Cause affirmée qui valide le défaut observé	Importance relative de cette cause dans le mécanisme de détérioration
Fissures longitudinales (famille D2)	1-pénétration différentielle du gel ; 2-mauvais drainage interne et/ou système de drainage; 3-sol support gélif; 4-instabilité latérale; 5-largeur de voie trop étroite	<u>1-très important</u> ; <u>2-très important</u> ; <u>3-très important</u> ; 4-important; 5-important
Fissuration dans les piste de roues et ornière à grand rayon (famille D4)	1-usure du mélange; 2- zone de sollicitation accrue; 3-pénétration différentielle du gel; 4-manque de drainage des couches de la structure ou de la surface	1-important; <u>2-très important</u> ; 3-peu important; 4- important
Affaissement latéral et dépressions locales (famille D5)	1-hétérogénéité des matériaux; 2-infiltration de surface; 3- succion de l'eau vers la structure; 4-gel de l'eau dans la structure; 5-remblai et déblai instables; 6- instabilité latérale; 7-effet récurrent des cycles de gel et de dégel	1-important; 2-important; 3-important; <u>4-très important</u> ; <u>5-très important</u> ; <u>6-très important</u> ; <u>7-très important</u>
Fissures en mailles et carrelages (famille D1)	1-oxydation et vieillissement du mélange, 2-tassements	<u>1-très important</u> ; 2-peu important

Le rapport de LVM-Fondatec de mai 2005 résume la liste des causes des défauts de surface relevés sur les lieux comme suit : fatigue du revêtement (trafic lourd), structure de chaussée de capacité structurale insuffisante, mauvais drainage, vieillissement de l'enrobé,

infrastructure gélive avec une protection insuffisante, épaisseur de revêtement insuffisante, manque de support latéral.

En raison des moyens financiers disponibles pour le développement de l'outil dans le cadre de ce mémoire, il était impossible d'effectuer les essais du groupe G4 – Essais non destructifs et du type « FWD ». Donc, la capacité structurale de la chaussée n'a pu être évaluée, et les causes reliées à ce volet de l'analyse n'ont pu être officiellement affirmées. Par contre, une analyse succincte des causes listées dans le tableau ci-dessus démontre que les causes les plus importantes qui sous-tendent les défauts relevés sont :

- problème de drainage de surface et/ou interne
- effet des cycles de gel et dégel (structure et sol support)
- instabilité latérale et/ou en remblai et déblai
- oxydation et vieillissement
- zone de sollicitation accrue

Comme l'exemple précédent, cet exercice de validation de l'outil confirme que le diagnostic rendu par le gestionnaire qui utilise l'outil pointe vers les mêmes causes de détérioration que celles précisées par l'ingénieur routier de la firme privée, exception faite de celles potentiellement liées aux capacités de portance de la structure en place pour les raisons évoquées ci-haut.

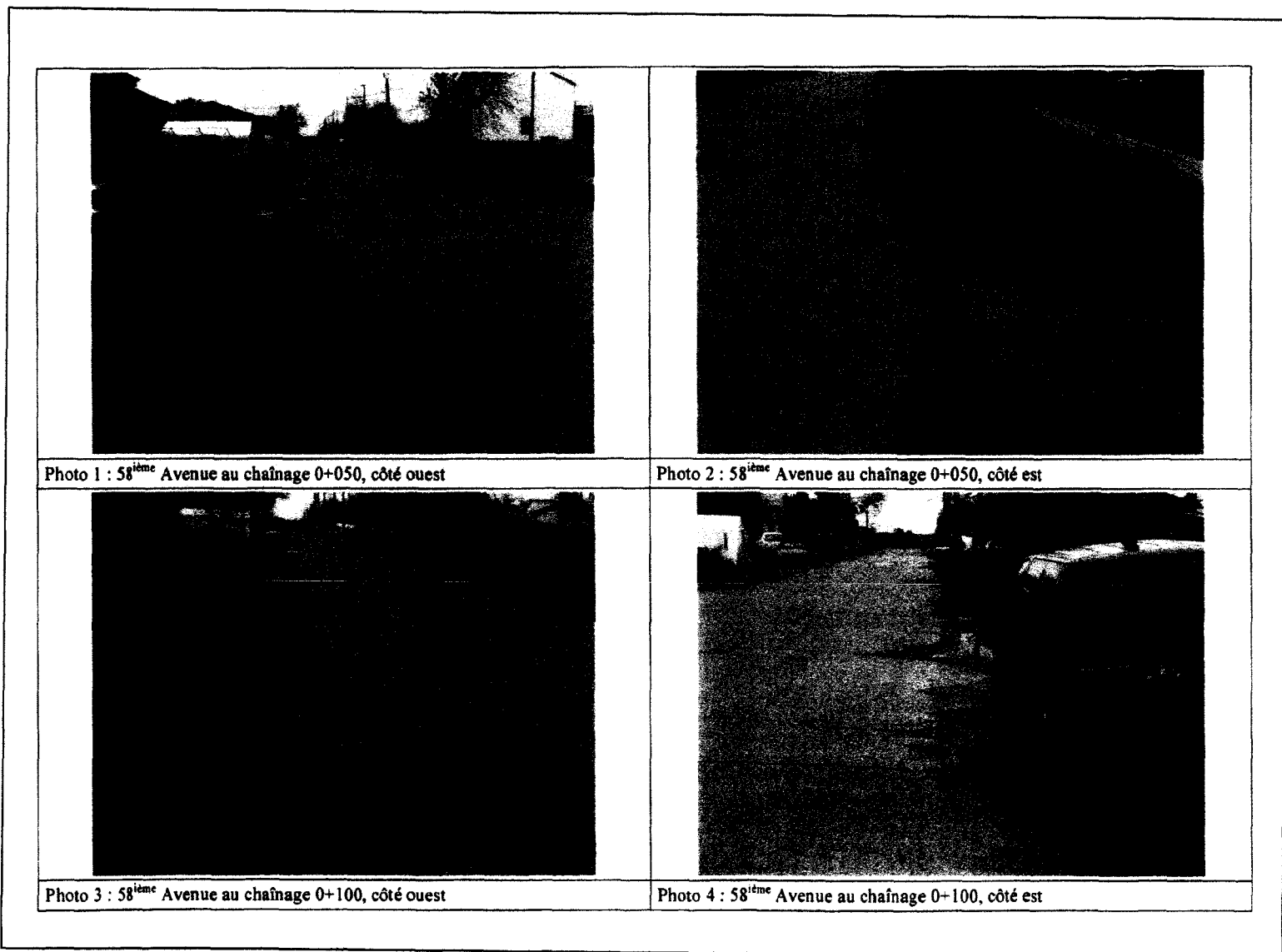
6.2.3 Troisième exemple de validation

Caractéristiques du tronçon : 58^e Avenue, Arrondissement Rivière-des-Prairies, Montréal – entre le boulevard Maurice-Duplessis et le boulevard Perras (longueur 800 mètres) :

- ✓ route locale et résidentielle;
- ✓ trafic lourd de l'ordre de 5%;
- ✓ trafic annuel estimé à 9 000 ECAS;
- ✓ tronçon entre 2 intersections en croix;
- ✓ direction Nord-Sud en chaussée commune;
- ✓ cours d'eau formé de la rencontre des terrasses existantes avec le bord de pavage de la chaussée (celles-ci sont en gazon ou en pavage selon l'aménagement de l'emprise);
- ✓ une (1) voie de circulation dans chaque direction;
- ✓ possibilité de stationnement dans les deux directions simultanément;
- ✓ voies d'une largeur de 3,5 à 4,5 mètres;
- ✓ système de drainage latéral inexistant lorsque la pente longitudinale de la rue est de 2,5% à 3,5%, alors qu'un système de drainage avec puisard est présent lorsque la pente longitudinale est inférieure à 2,5%.

Historique connu : Les années 60 ont marqué une croissance élevée de la démographie du quartier de Rivière-des-Prairies. Ce qui nous amène à supposer que la 58^e Avenue a dû être construite entre 1965 et 1975. La structure de chaussée actuelle est en place depuis plus de 30 ans. Aucune autre intervention majeure n'a été réalisée depuis la construction, à l'exception de plusieurs réparations locales. Ces dernières sont généralement situées en bordure des cours d'eau et s'étalent, dans certains cas, jusqu'au centre de la rue.

Figure 6.18 Photos n^{os} 1 à 4 de la 58^e Avenue, Montréal. (LYN-Fondatic, 2004)



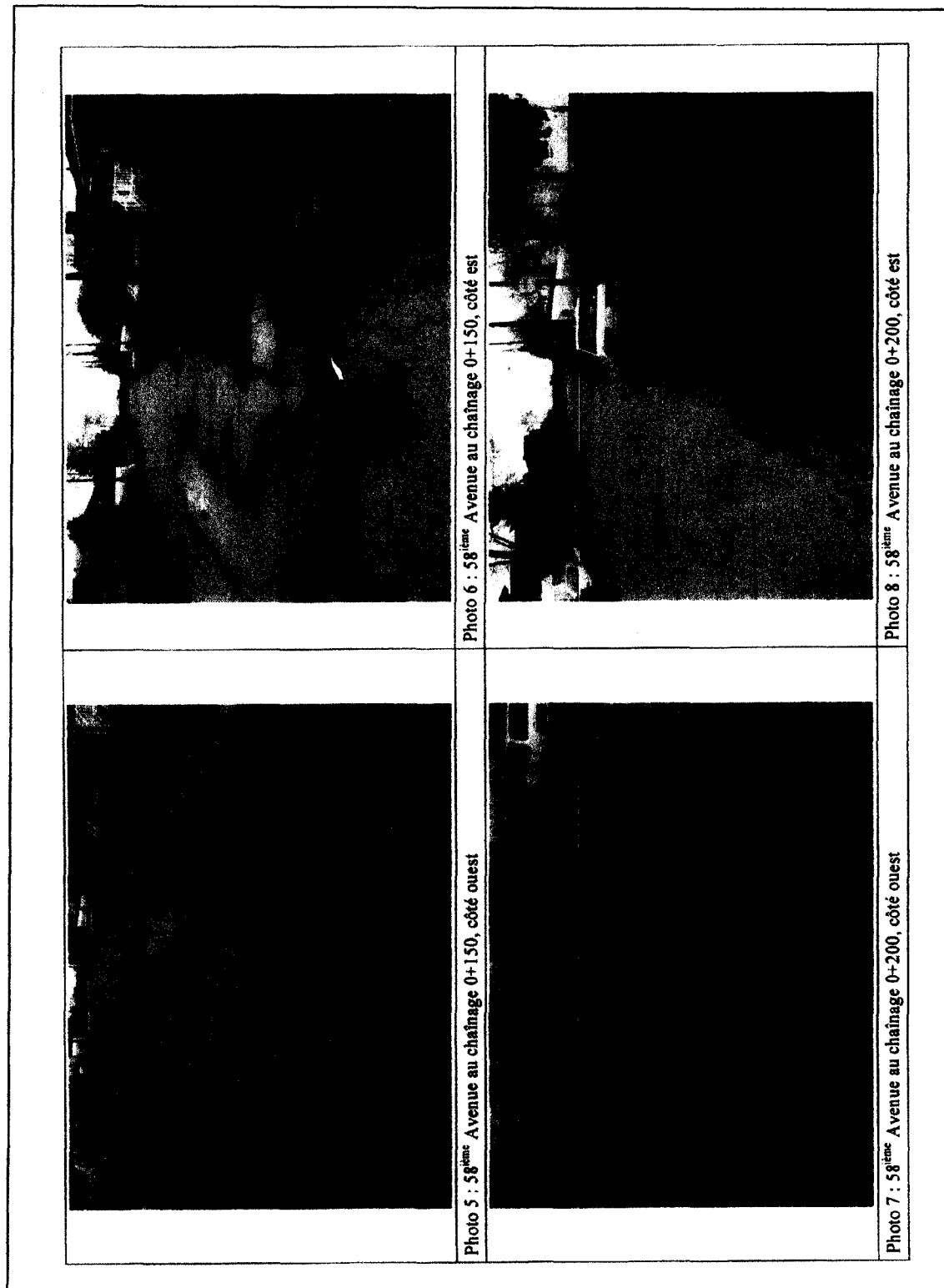


Figure 6.19 Photos n^{os} 5 à 8 de la 58^e Avenue, Montréal. (LVM-Fondatec, 2004)

Figure 6.20 Photos n° 13 à 16 de la 58^e Avenue, Montréal. (LVN-Fondtec, 2004)

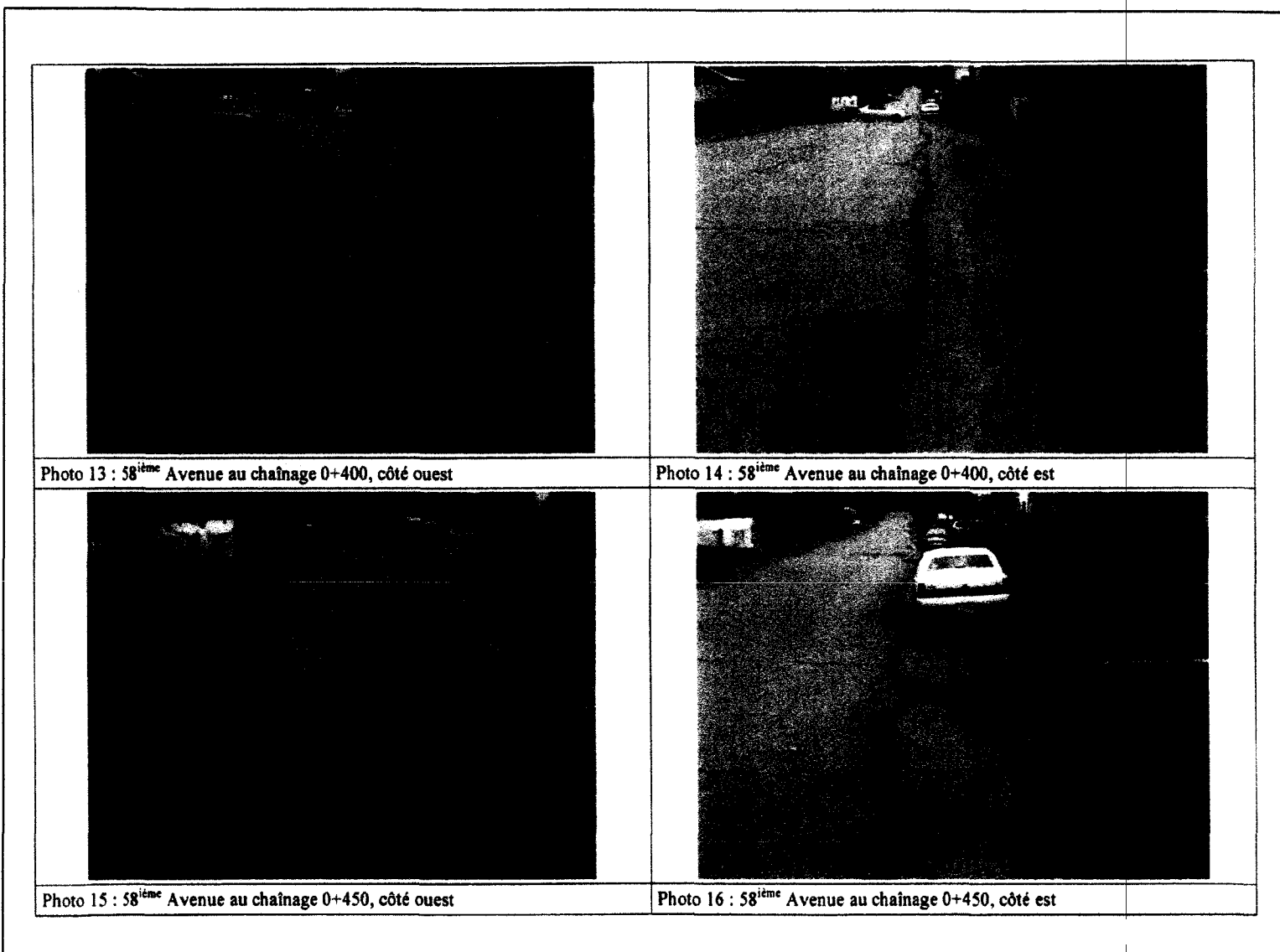
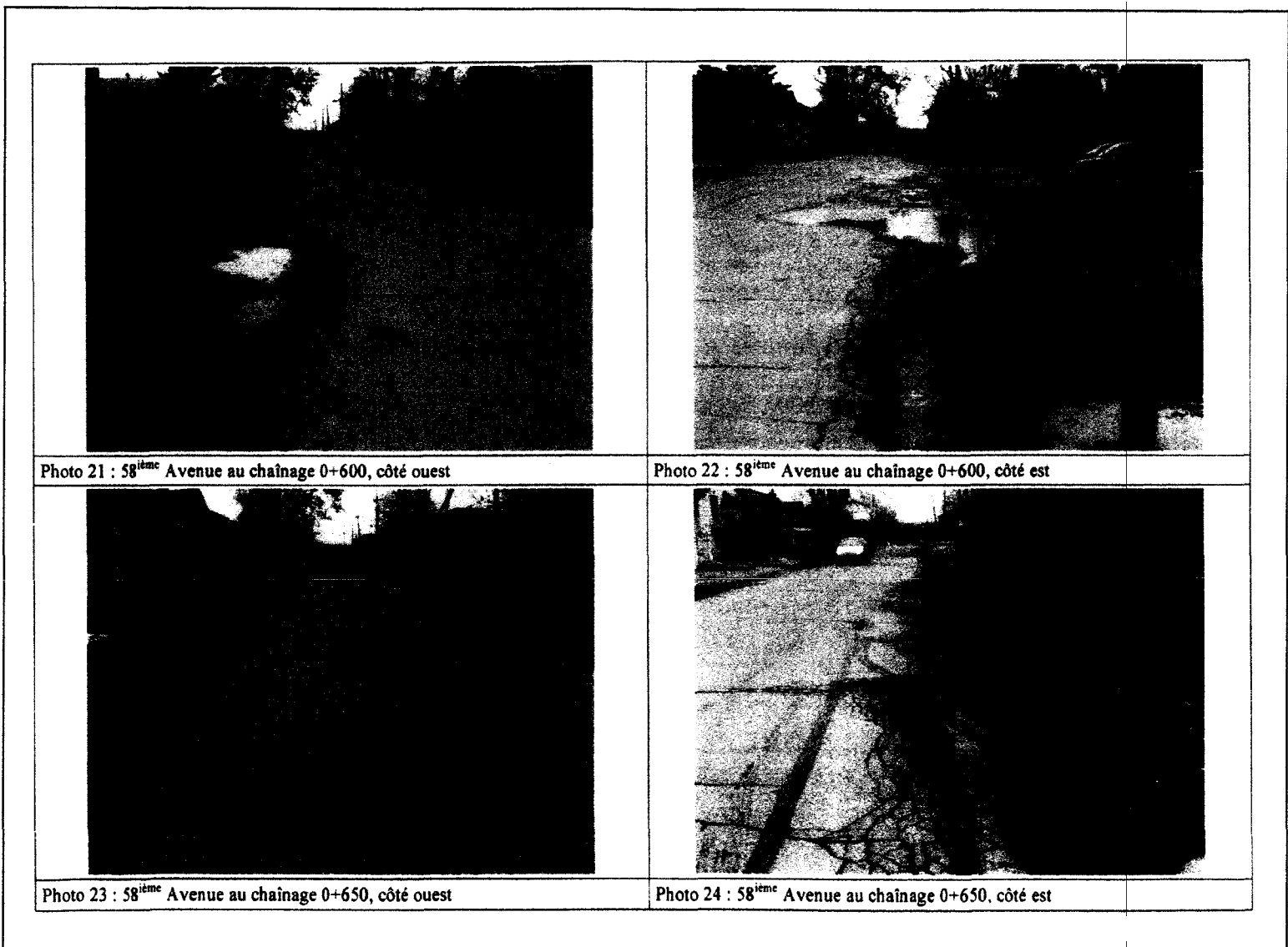


Figure 6.21 Photos n^{os} 21 à 24 de la 58^e Avenue, Montréal. (LVM-Fondatec, 2004)



Défauts observés : Ces défauts sont présentés en ordre décroissant :

- ✓ 1) fissures transversales – présentes de façon récurrente à tous les 15 mètres ($\pm$ cinq mètres) sur toute la largeur du tronçon et sur l'ensemble de la surface de la chaussée (l'ouverture des fissures est supérieure à quelques millimètres, mais est inférieure à un centimètre);
- ✓ 2) fissures longitudinales de rive – d'une ouverture de plus de cinq mm, mais inférieures à deux centimètres, elles sont souvent accompagnées de fissures en maille et de carrelage. Il semble que sous l'action du temps, le pavage se fragmente en petits morceaux aux endroits où ce dernier rencontre les terrasses existantes;
- ✓ 3) fissures longitudinales rectilignes – généralement situées au centre de la section de chaussée, elles sont accompagnées de lézardes et de carrelage dans une proportion de 50%;
- ✓ 5) affaissements – observés aux endroits où le pavage existant est le plus fissuré, les dépressions sont plus souvent présentes au bord du pavage, mais on les relève également dans les pistes de roues des véhicules (dans ce dernier cas, certains affaissements présentent des nids-de-poule).

Tableau 3.3

Causes symptômes Défauts symptômes	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
D1 - Fissures transversales / maillages / carréage	retrait thermique – rupture de fatigue – oxydation et vieillessement	retrait thermique des couches granulaires – consolidation et tassement	mouvement hydraulique de sol support	S/O	diminution de la section du revêtement	remontée de fissures – surchauffe du mélange
D2 - Fissures longitudinales	S/O	manque de portance en période de dégel granulométrique retrait thermique des couches granulaires pénétration différentielle du gel	apport en eau latéral – gel de l'eau dans la structure – mauvais drainage interne ou du système de drainage	sol support gélif – tassement et/ou glissement de terrain – mobilité latérale	S/O	largeur de voie trop étroite – mouvement vertical issu d'un manque de compaction – mauvaise construction d'un joint longitudinal – ségrégation à la pose
D3 - Défauts du revêtement	rupture de fatigue – oxydation et vieillessement – dosage du bitume – séparation des granulats par l'eau – déficience en vide – épaisseur insuffisante d'une couche – manque d'adhérence à l'interface	faiblesse ponctuelle – manque de portance en période de dégel	infiltration de surface – apport latéral et /ou souterrain en eau – suction de l'eau vers la structure – mauvais drainage interne – gel de l'eau interne	S/O	S/O	excès de liant d'accrochage – mauvaise méthode de resurfaçage – ségrégation à la pose

Figure 6.22 Utilisation du Tableau 3.3 pour le troisième exemple de validation.

Figure 6.23 Utilisation du Tableau 3.3 (suite) pour le troisième exemple de validation.

Tableau 3.3 (suite)

Causes impliquées Défauts impliqués	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
D4 – Défauts et fissuration dans les pistes de roues	angularité des granulats – rupture de fatigue – usure du mélange – stabilité et dosage du bitume – zone sollicitation accrue – manque d'adhérence à l'interface	manque de capacité structurale – manque de portance en période de dégel – pénétration différentielle du gel – fatigue et/ou usure structurale	manque de drainage des couches de la structure ou de la surface	S/O	S/O	mouvement vertical issu d'un manque de compaction – mauvaise mise en place et/ou compaction du mélange – mauvaise construction d'un joint longitudinal
D5 – Désordre du profil	S/O	hétérogénéité des matériaux – manque de portance en période de dégel	infiltration de surface – apport latéral et /ou souterrain en eau – suction de l'eau vers la structure – gel de l'eau dans la structure	remblai et déblai instables – tassement et/ou glissement de terrain – instabilité latérale – effets récurrents des cycles de gel et dégel – nappe phréatique élevée	désagrégation de l'accès par la saumure – perte de matériaux autour de l'accès – impact dynamique et déplacement du cadre de l'accès – rupture et/ou faible profondeur d'une structure souterraine	mouvement vertical issu d'un manque de compaction – mauvaise transition de construction

Figure 6.24 Utilisation du Tableau 4.3 pour le troisième exemple de validation.

Tableau 4.3

Groupes	Causes impliquées					
	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
	zone sollicitation accrue – adhérence et épaisseur des couches – usure du revêtement – oxydation du mélange	faiblesses ponctuelles – tassements – comportement gélif – déneigement	écoulement de surface de l'eau – infiltration de surface – efficacité du système de drainage – apport latéral en eau	remblai et/ou déblai – sol argileux ou marécageux – tassement et/ou relâchement du support latéral – effet récurrent des cycles gel/dégel – niveau de la nappe phréatique	faible profondeur des conduites – mauvais état des services enfouis – diminution de la section de chaussée – déplacement du cadre – perte de matériaux – désagrégation de la cheminée – état de l'accès à la surface – impacts dynamiques	excès de liant d'accrochage – ségrégation à la pose – mauvais joint de construction – largeur de voie – manque de remblai – transition inadéquate
	épaisseur insuffisante et/ou changement de vocation – vieillissement du pavage	discontinuité de la structure et/ou étape de construction	S/O	secteur de remblai et/ou déblai – type de sol instable – gélivité du sol support	historique des interventions et/ou mauvais état des services enfouis	mauvaise méthode de compaction
	manque d'adhérence et/ou sous-dimensionnement de l'épaisseur des couches à cause du volume de trafic	capacité portante insuffisante due au trafic et/ou en période de dégel	S/O	S/O	S/O	S/O

Figure 6.25 Utilisation du Tableau 4.3 (suite) pour le troisième exemple de validation

Tableau 4.3 (suite)

Causes Défauts	C1 - Enrobés bitumineux	C2 - Structure de chaussée	C3 - Drainage	C4 - Sol support	C5 - Infrastructures souterraines	C6 - Travaux et mise en œuvre
	sous-dimensionnement de l'épaisseur des couches et fatigue du revêtement	capacité portante insuffisante due au trafic et/ou en période de dégel – fatigue structurale	S/O	instabilité du remblai et vérification du Mr	S/O	manque de compaction de l'enrobé
G5 - Carottage de la chaussée	S/O	retrait thermique des matériaux – épaisseurs des couches de la structure	S/O	S/O	S/O	remontée de fissures transition inadéquate entre les matériaux
	dosage du mélange – déficience en vide – angularité et type de granulats – mauvais enrobage – stabilité par temps chaud – retrait thermique et fragilisation du bitume	usure des matériaux – granulométrie	mouvement hydraulique et/ou affouillement – capillarité des couches granulaires	sensibilité à l'humidité des matériaux du sol	S/O	surchauffe du mélange lors de la pose
	S/O	hétérogénéité des couches de la structure	drainage des couches de la structure	gélivité du sol support	S/O	présence de matériaux inadéquats
	S/O	S/O	assèchement du sol support	caractérisation des matériaux du sol	S/O	S/O

Tableau 6.3

Étape 4) Consignation des informations du troisième exemple

Défauts relevés initialement	Cause affirmée qui valide le défaut observé	Importance relative de cette cause dans le mécanisme de détérioration
Fissures transversales (famille D1)	1-retrait thermique ; 2-oxydation et vieillissement; 3-tassements; 4-diminution de la section de revêtement	<u>1-très important</u> ; <u>2-très important</u> ; 3-peu important; 4-important
Fissuration longitudinale en rive et rectiligne (famille D2)	1-granulométrie; 2- pénétration différentielle du gel; 3-gel de l'eau dans la structure; 4- mauvais drainage interne et/ou du système de drainage; 5- sol support gélif; 6- instabilité latérale; 7-mauvaise construction d'un joint longitudinal	1-important; <u>2-très important</u> ; <u>3-très important</u> ; 4- important; <u>5- très important</u> ; <u>6-très important</u> ; 7-important
Affaissement (famille D5)	1-hétérogénéité des matériaux; 2- infiltration de surface; 3- succion de l'eau vers la structure; 4-gel de l'eau dans la structure; 5-instabilité latérale; 6-effet récurrent des cycles de gel et de dégel	1-important; 2-important; <u>3-très important</u> ; 4-très important; <u>5-très important</u> ; <u>6-très important</u>

Le rapport de LVM-Fondatec de novembre 2004 justifie les symptômes observés par l'hypothèse suivante :

« Cet état de fissuration est généralement attribuable à une structure de chaussée de faible épaisseur offrant une capacité portante insuffisante, à une infrastructure gélive, à des matériaux inadéquats ou mal compactés, à

un mauvais drainage, à un manque de support latéral, au retrait thermique et au vieillissement de l'enrobé . On remarque également la présence de dénivellation et/ou de fissures à l'endroit des puisards et des regards, résultant des cycles de gel et dégel. » (LVM-Fondatec, 2004, p.10)

L'avenue à l'étude est destinée à l'usage local seulement, ce qui tend à rendre négligeable les propriétés de portance de la chaussée. La capacité structurale de la chaussée n'a pas été évaluée, mais les essais de caractérisation des différentes couches ont confirmé un manque d'épaisseur de l'enrobé et des couches granulaires par rapport aux normes actuelles. De plus, une analyse succincte des causes listées dans le tableau ci-dessus démontre que les causes importantes qui sous-tendent les défauts relevés sont :

- retrait thermique de l'enrobé
- oxydation et vieillissement
- gel de l'eau dans la structure
- effet des cycles de gel et dégel (structure et sol support)
- instabilité latérale et tassements
- mauvais drainage de surface et/ou interne

Ce dernier exercice de validation de l'outil confirme que le diagnostic rendu est conséquent avec les hypothèses posées par les ingénieurs qui ont analysé l'état de décrépitude avancée de l'avenue dans le cadre d'un mandat officiellement octroyé par la Ville de Montréal. Cette conclusion est tirée grâce aux types de causes mises en valeur par le diagnostic prodigué à l'aide de l'outil.

En conclusion, il ressort des trois (3) exemples que l'outil développé dans ce mémoire fait bien ressortir et même enrichit le diagnostic établi par LVM-Fondatec.

CONCLUSION

Le dernier chapitre de ce mémoire est présenté afin de synthétiser l'aboutissement de l'outil développé, de rappeler les objectifs visés par l'élaboration du procédé automatique d'analyse et d'apprécier les possibilités de développement de l'outil mis de l'avant pour le diagnostic des chaussées flexibles.

Les exemples de validation présentés précédemment démontrent que la méthode appliquée pour l'analyse d'une structure souple est automatiquement prise en charge grâce à la chronologie des étapes prescrites par l'organigramme de diagnostic d'une chaussée flexible. En effet, en appliquant systématiquement la mécanique proposée, l'analyste peut s'en remettre à l'outil pour le diriger vers les groupes d'essais qui lui permettront de vérifier la présence des causes qui engendrent les défauts observés. La mécanique rationnelle sur laquelle repose le diagnostic permet à l'utilisateur de concentrer ses efforts d'analyse sur l'importance des liens causaux mis en évidence à l'étape de consignation des causes affirmées et validées.

La méthodologie d'application de l'outil prône l'exécution des essais par groupe pour l'affirmation de toutes les causes potentiellement responsables des défauts-familles impliqués dans l'analyse. Grâce aux familles de défauts et de causes, la spécificité du lien entre le défaut et une cause est difficilement retraçable durant les étapes intermédiaires du diagnostic des causes. En effet, les liens causes-défauts deviennent nébuleux par l'utilisation du regroupement par famille. L'analyste ne peut donc pas facilement anticiper le résultat d'un essai dans le but de lui permettre d'intuitivement supposer une cause en utilisant l'outil. Cet aspect de la mécanique rationnelle assure toutefois une plus grande rigueur dans l'interprétation des résultats, même si la nature humaine tend à vouloir poser le diagnostic avant que les essais ne soient complétés. Pour ces raisons, le choix d'essais est plus impartial et mieux conduit en fonction des caractéristiques propres de la structure étudiée. Également, l'ordonnancement des essais présentés dans l'Annexe 1 assure une meilleure complémentarité des résultats probants grâce à la complémentarité des uns par rapport à d'autres. Ceci, tout en sachant qu'une grande partie des frais engendrés par le diagnostic est

issue des essais à réaliser et aux frais fixes qui s'y rattachent. De plus, il présente des avantages particuliers en ce qui a trait à la faisabilité et la rentabilité des essais à conduire. Dans le contexte économique du Québec et la désuétude du réseau routier, il va de soi que la rentabilité des études réalisées au niveau projet doit être considérée pour ne pas gaspiller les ressources limitées des citoyens québécois.

Les résultats issus de l'exécution des essais permettent d'affirmer la présence de la cause qui a déclenché un mécanisme de détérioration, mais c'est la présence du lien entre le symptôme et cette cause qui valide l'action du mécanisme. Or, le lien de cause à effet est nébuleux dans une structure routière flexible à cause des impondérables entre les diverses causes ciblées et l'étendue, voire même la sévérité de certains défauts. En effet, la complexité des mécanismes de détérioration est telle que seuls les experts en la matière sont en mesure d'élucider leurs mystères. Les mécanismes doivent être connus pour élaborer et comprendre les interactions entre les défauts et les causes présentes. C'est dans cet aspect de l'analyse que les familles jouent un rôle essentiel. En effet, si le regroupement par famille de causes dissout le lien direct reconnu entre une cause et un défaut, il permet d'éliminer celles qui ne sont pas à valider pour un type de dégradation relevé. Comme un défaut peut être dû à une ou plusieurs causes, le lien entre défaut-famille et cause-famille permet de confiner le nombre de possibilités à analyser. Ceci dirige l'utilisateur de l'outil dans son diagnostic pour qu'il analyse seulement les causes potentiellement problématiques pour chacun des défauts-familles auxquels elles sont attitrées. L'analyste peut donc être néophyte en matière de dégradation et de mécanisme de détérioration de chaussée souple, il peut tout de même réaliser les essais pertinents en fonction des causes ciblées aux étapes préliminaires du diagnostic.

Les matrices présentées aux Chapitres 3 et 4 représentent des sources d'interprétation des défauts et des causes pour quiconque n'est pas expert en génie routier. En effet, l'ensemble des causes contenues dans la matrice, précisées par le Tableau VI, peuvent être affirmées par les essais couramment utilisés. L'unique présentation de l'information contenue sous

une forme matricielle représente une source de référence pour un gestionnaire de réseau inquiet de l'état d'une chaussée. En consultant cette matrice, le propriétaire possède plus d'informations pour reconnaître quels essais il devra réaliser pour connaître les causes du tronçon étudié. En ce qui concerne la matrice de validation des défauts, représentés au Tableau III, un gestionnaire aguerri qui reconnaît certains des problèmes de son réseau routier, à cause des effets récurrents de gel et dégel par exemple, est en mesure de filtrer les défauts qui proviennent de cette famille de causes plutôt que d'une autre. L'inverse est également possible, les défauts observés à la surface des rues peuvent être directement associés à certaines familles de causes. Celles-ci comportent peut-être des causes reconnues par le gestionnaire sur un tronçon similaire qui a déjà été analysé, elles pourront alors être vérifiées par une simple consultation. L'adoption de l'outil par une municipalité permettrait à un gestionnaire d'utiliser l'information qui s'y trouve pour lui permettre de choisir quels résultats d'un mandat d'étude il recherche octroyer à une firme externe. Il permettra également de mieux asseoir son choix d'interventions à réaliser pour la correction du tronçon qui a reçu le plus de plaintes des citoyens durant la dernière année, ou même d'expliquer la source des défauts observés à un décideur récalcitrant de libérer une plus grande part de l'enveloppe budgétaire.

L'objectif de cet outil de diagnostic a été rencontré puisqu'il fournit une mécanique rationnelle qui permet l'analyse des causes qui engendrent les mécanismes de détérioration qui modifient le comportement d'une structure de chaussée flexible dans le temps. L'utilisation systématique de l'outil conduit le diagnostic des causes qui ont engendré les défauts relevés sur les lieux. Le diagnostic réalisé par l'analyste qui utilise l'outil tient compte des défauts de surface, des caractéristiques propres de la structure étudiée, du type de sol support et du trafic auxquels la route est confrontée. Il assure la rigueur du diagnostic par rapport aux conditions d'utilisation de la route étudiée et produit un résultat automatique en ciblant l'essai qui permet l'affirmation de la présence de la cause.

Par contre, l'outil développé n'a pas été doté d'un mécanisme automatique qui permettrait d'assurer le raffinement des diagnostics prodigués par un même utilisateur. Grâce à la méthodologie d'application préconisée, l'analyse des mécanismes de détériorations subies par une chaussée souple est efficacement menée à terme. Cependant, la procédure d'analyse proposée est invariable et strictement répétitive en fonction des familles, groupes et essais pertinents pour chacun des diagnostics posés. Le succès d'un diagnostic mené au moyen de l'outil présenté dans ce mémoire, repose donc sur les liens interfamiliaux entre les défauts et les causes, ainsi que sur l'efficacité des essais préconisés à l'Annexe 1. Dans le but de parfaire la mise en application de l'outil, afin d'améliorer le rendement des diagnostics, l'analyste qui l'utilise peut facilement modifier les divers essais et familles élaborés dans ce mémoire. Par exemple, l'utilisateur qui reconnaît, aux termes de plusieurs diagnostics, qu'un des essais préconisés à l'Annexe 1 ne permet jamais d'affirmer la présence de la cause et que celui-ci est coûteux pour l'organisation. Il est possible pour ce dernier de procéder au remplacement ponctuel de l'essai préconisé par un autre qu'il croit plus rentable. Ce changement n'affecte pas le fonctionnement de l'outil. De plus, les futurs diagnostics seront plus efficaces grâce à cette amélioration ponctuelle. Dans le cas où le lien entre un défaut et une cause ne serait jamais validé, il serait possible pour un ingénieur aguerri de remettre en question le lien causal qui lie le défaut et la cause présentée dans la matrice synthèse du Chapitre 3. Cette observation pourrait alors être instigatrice d'une certaine remise en question de l'application de cet aspect du mécanisme de détérioration qui relie le défaut à la cause impliquée. Cependant, pour raisonnablement remettre en question un lien causal, il est impératif que tous les groupes d'essais soient complétés selon l'Annexe 1 et que les résultats affirment clairement la présence de la cause dans les chaussées analysées. Dans ce dernier cas, l'ingénieur peut ponctuellement modifier ou retirer la cause qui relie exclusivement les familles de défauts et de causes impliqués dans les mécanismes concernés. Enfin, cette modification n'affecte pas le mécanisme d'application de l'outil et la véracité du diagnostic prodigué.

Le réseau routier québécois est en piteux état et les automobilistes s'en plaignent constamment. Les chiffres présentés au début de cet ouvrage démontrent qu'ils ont raison. La culture de réhabilitation des chaussées est en plein essor et cette tendance n'est pas prête à s'atténuer. Les routes au Québec sont plus détériorées que chez nos voisins et nous sommes moins nombreux pour payer les mêmes sommes d'argent par kilomètre de route à reconstruire. Des choix importants se dressent devant les gestionnaires de réseau qui doivent maintenant rendre des comptes aux citoyens qui exigent maintenant des résultats durables grâce aux interventions chèrement payées de leurs taxes municipales. En considérant que la moitié des travaux réalisés sur nos routes a été choisie à partir de l'état de la surface du tronçon étudié, cet outil permet aux gestionnaires de justifier les décisions prises au moyen d'un système automatique et impartial.

Suite au développement de cet outil, il semble que son utilisation pourrait être aussi variée que prometteuse. En effet, la présentation, sous forme de logiciel, pourrait être développée à partir d'une base de données. Celle-ci pourrait être conçue autour des symptômes et des causes présentés aux Chapitres 2 et 3. Elle comprendrait tous les groupes d'essais, de même que les essais alternatifs pertinents en fonction des causes à valider. Un logiciel automatique, qui comporterait des écrans de saisies d'informations et qui utiliserait la mécanique d'affirmation et de validation démontrée par l'organigramme du Chapitre 5, permettrait une application plus conviviale de son utilisation. L'analyste pourrait alors consigner les informations dans les plages de saisies de données afin que la mécanique de l'outil réagisse à ces informations par des questions posées à l'utilisateur l'amenant ainsi plus rapidement au diagnostic souhaité. Ceci assurerait une plus grande efficacité de la méthode en temps réel sur les lieux. Aussi, la base de données pourrait être bonifiée des frais moyens associés à chacun des essais, permettant ainsi au gestionnaire d'estimer le budget nécessaire pour l'octroi d'un contrat à une firme privée ou à la location des appareils d'essais.

Le diagnostic prodigué grâce à l'outil cible les causes de détérioration de la chaussée flexible étudiée. Un outil similaire à celui présenté pourrait prendre en charge les résultats obtenus par le diagnostic afin de recommander les travaux qui permettent de corriger les mécanismes de détérioration en action grâce causes reconnues. En effet, l'application du principe des familles pourrait également être mise de l'avant pour regrouper les méthodes connues de réhabilitation et/ou de reconstruction de chaussée flexible, tout en assurant la flexibilité de l'ajout des nouvelles techniques qui seront développées dans un proche avenir. Dans ce cas, le nouvel outil développé serait complémentaire à celui présenté dans ce mémoire. En jumelant les deux outils au moyen d'un système informatisé, l'utilisateur serait alors en mesure de diagnostiquer et de recommander l'intervention appropriée de façon impartiale et efficiente.

ANNEXE I

ESSAIS RÉALISABLES SUR LES CHAUSSÉES FLEXIBLES

Essais préconisés pour affirmer les causes potentielles

Nom de l'essai	Ordre d'exécution des essais	Essais préconisés	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés	Cause à affirmer
Évaluation de l'enrobé				C1-A) Mauvaise formulation
LC _A	1	Détermination de la teneur en bitume LC 26-100 ou LC 26-700	Prélèvement d'un échantillon représentatif, extraction du bitume (LC 25-001) nécessaire pour réaliser l'essai du module complexe LC 26-700 ou de la teneur en bitume LC 26-100 / 110 et 150	Sous ou surdosage et/ou mauvaise formulation
LC _B	2	Pourcentage de vide et compacité LC 26-320	Prélèvement d'un échantillon représentatif, réalisation de l'essai LC 26-320 et comparaison avec les normes actuelles	Déficiences en vide
LC _C	3	Caractériser mélange et pourcentage de particule fracturée LC 21-100	Historique de construction nous informera de la provenance des granulats. Prélèvement d'un échantillon représentatif et réalisation de l'essai LC 21-100 (indication de la portion non fracturée des granulats)	Agrégat hydrophile ou bitumophobe et/ou trop arrondi
LC _D	4	Teneur en eau des granulats LC 26-065 ou 066 ou 067	Prélèvement d'un échantillon représentatif, extraction des granulats et réalisation de l'essai LC 26-065/066/067 dans le but de connaître la teneur permanente en eau dans le mélange	Mauvais enrobage
				C1-B) Stabilité de l'enrobé
O V	1	Observation visuelle	Les déformations du revêtement se présentent perpendiculairement au sens du trafic et sous forme de bosse de type "planche à laver" plus précisément dans les zones de freinage accrues ou du même type	Zone de sollicitation accrue
LC _E	2	Détermination de la plage PG du bitume	Prélèvement d'un échantillon représentatif, récupération du bitume LC 25-001 et réalisation de l'essai de détermination de la plage PG du bitume ou de recouvrance d'élasticité LC 25-005	Stabilité par temps chaud

Essais préconisés pour affirmer les causes potentielles

Nom de l'essai	Ordre d'exécution des essais	Essais préconisés	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés	Cause à affirmer	
(C1-C) Épaisseur et adhérence interne					
HIST+OV	1	Utilisation actuelle vs vocation historique	Recherche historique sur l'ancienne vocation du tronçon par rapport à la vocation actuellement observée	Épaisseur insuffisante	
TRAF+OV	2	Vérification du trafic et observation visuelle	Vérification du type et de la quantité de trafic par rapport aux critères utilisés lors de la construction (historique des critères, si possible)	Adhérence des couches	
FWD + TRAF	3	Essais de portance et vérifier le nombre structural de l'AASHTO	Calculer le nombre structural total pour le trafic actuellement observé par rapport au nombre structural (SN) actuellement estimé par les essais de type FWD	Sous-dimensionnement de l'épaisseur	
(C1-D) Usure et vieillissement					
OV	1	Observation visuelle	Vérification visuelle des granulats et des déformations de surfaces dans les pistes de roues. Vérifier la durée de vie effective de la chaussée actuellement en place	Usure due au trafic	
LC _E	2	Observation visuelle et Plage PG du bitume ou essais de retrait empêché	La récurrence de la fissuration transversale sans raison apparente et le prélèvement d'un échantillon représentatif, récupération du bitume LC 25-001 et réalisation de l'essai de détermination de la plage PG du bitume ou de recouvrance d'élasticité LC 25-005	Retrait thermique et fissuration ou fragilisation du bitume	
FWD	3	FWD et vérification du bassin de déformation	L'étendue du bassin de déflexion représente une indication de la fatigue du revêtement	Fatigue du revêtement	

Essais préconisés pour affirmer les causes potentielles

Nom de l'essai	Ordre d'exécution des essais	Essais préconisés	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés	Cause à affirmer
<u>Évaluation de la structure</u>				C2-A) Capacité insuffisante
OV	1	Observation visuelle	Essais de portance avec un camion chargé et/ou observation ponctuelle de la structure et de son utilisation par le trafic	Faiblesse ponctuelle
FWD + TRAF	2	Essais de portance FWD	Vérification de la portance relevée en été, estimée à l'aide d'un essai de type FWD et du calcul du nombre SN de l'AASHTO, par rapport au trafic actuel	Capacité portante insuffisante
FWD + TRAF	3	FWD printemps vs été	Vérification de la portance relevée au printemps, estimée à l'aide d'un essai de type FWD et du calcul du nombre SN de l'AASHTO, par rapport au trafic printanier	Dégel et capacité structurale insuffisante
				C2-B) Usure et fatigue
LC _F	1	Pourcentage d'usure Micro-Deval LC 21-101 et LC 21-070 ou Los Angeles LC 21-400	Utilisation des échantillons prélevés, et d'autres échantillons typiques, pour effectuer la caractérisation des couches de matériel comme la granulométrie et les essais d'usure type LC 21-101 / 070 ou LC 21-400 et comparer avec les normes actuelles d'usure des matériaux	Usure des matériaux
FWD	2	FWD et SN de l'AASHTO	Vérification de la portance relevée en été, estimée à l'aide d'un essai de type FWD et du calcul du nombre SN de l'AASHTO, par rapport au trafic actuel	Fatigue structurale

Essais préconisés pour affirmer les causes potentielles

Nom de l'essai	Ordre d'exécution des essais	Essais préconisés	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés	Cause à affirmer
C2-C) Comportements différentiels				
OV	1	Observation visuelle	Vérification des dépressions visuellement observables dans la chaussée et/ou dans toute l'emprise du tronçon à évaluer	Consolidation et tassements
OV	2	Observation de la neige en bordure de la route	Vérification de la pénétration différentielle du gel imposée par l'accumulation de neige sur la chaussée par rapport au centre de rue	Comportement gélif
HIST+OV	3	Historique et observation visuelle	Vérification des étapes de construction ou hypothèse des phases de construction dans le contexte d'origine jusqu'à aujourd'hui	Discontinuité de la structure
CAR+OV	4	Carottage et observation visuelle	Carottage d'une fissure typique et observation de la pénétration de la fissuration dans l'enrobé et dans les couches granulaires	Retrait thermique
CARACT	5	Historique, carottage et observation visuelle	Utilisation des échantillons prélevés, et d'autres échantillons typiques, pour effectuer la caractérisation des couches de matériel	Hétérogénéité des couches

Essais préconisés pour affirmer les causes potentielles

Nom de l'essai	Ordre d'exécution des essais	Essais préconisés	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés	Cause à affirmer
<u>Évaluation du drainage général</u>				
				(3-A) Drainage de surface
OV	1	Observation visuelle	Vérification des accumulations d'eau à la surface de la chaussée	Écoulement des eaux
OV	2	Observation visuelle	Vérification des ouvertures sur la surface de l'enrobé qui présente des ouvertures propices à l'infiltration d'eau de ruissellement	Infiltration d'eau dans la structure
OV	3	Observation visuelle	Vérification des accumulations d'eau dans les réseaux souterrains avec les systèmes d'inspections spécialisés ou l'historique des interventions sur les réseaux enfouis	Efficacité du système de drainage
				(3-B) Drainage interne de la structure
OV	1	Observation visuelle	Observation des pentes d'écoulement naturel de l'environnement autour de la chaussée et de l'élévation de nappe phréatique	Apport souterrain en eaux de ruissellement
CARACT	2	Matériaux fins et densité élevée	Carottage, caractérisation granulométrique et évaluation de la densité des couches granulaires en place	Drainage des couches granulaires
LC _G	3	Écoulement des granulats fins LC 21-075	Carottage, si nécessaire, et réalisation de l'essai LC 21-075 dans le but d'évaluer la quantité de particules fines qui ont migré	Mouvement hydraulique et/ou affouillement
FORAGE	4	Forage et teneur en eau	Forage dans le sol support et vérification de la teneur en eau du sol	Assèchement du sol support

Essais préconisés pour affirmer les causes potentielles

Nom de l'essai	Ordre d'exécution des essais	Essais préconisés	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés	Cause à affirmer
Évaluation du sol support C 4- A) Nature du sol support				
HIST+OV	1	Historique, forage et observation visuelle	Observation visuelle de la topométrie des terrains avoisinants et forage aux endroits stratégiques pour observer le type de remblai	Remblai et/ou déblai
HIST+OV	2	Historique et observation visuelle	Connaissance des sols avoisinants afin de poser l'hypothèse d'un type de sol support sous le tronçon	Sol argileux ou marécageux
FWD	3	Calcul du Mr ponctuel vs le Mr moyen du sol	Essais de type FWD sur un échantillon typique de la chaussée par rapport à un essai FWD à l'endroit instable observé	Instabilité du remblai
C 4- B) Support latéral				
OV	1	Observation visuelle	Dépression ponctuelle observable au dos des bordures	Manque de support latéral derrière les bordures
OV	2	Observation visuelle	Vérification visuelle des glissements de terrains naturels autour du tronçon ou du manque de matériel d'épaulement de la structure de chaussée du tronçon à vérifier	Relâchement ou perte de support latéral
C 4- C) Sensibilité au gel du sol support				
OV	1	Observation visuelle printemps vs été	Observation de l'ouverture de plusieurs fissures types en hiver par rapport à l'ouverture de ces mêmes fissures en été pour le tronçon	Effet récurrent des cycles et de gel et de dégel
HIST+ CARACT	2	Matériaux fins, limite de liquidité et densité élevée	Historique de construction et connaissance des sols avoisinants afin de poser l'hypothèse d'un type de sol support et/ou forage et caractérisation du sol support du tronçon routier	Gélivité du sol support

Essais préconisés pour affirmer les causes potentielles

Nom de l'essai	Ordre d'exécution des essais	Essais préconisés	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés	Cause à affirmer
C 4-D) Humidité du sol support				
OV	1	Informations connues et observables	Observation du niveau de la nappe phréatique autour du tronçon	Niveau de la nappe phréatique
LC _H	2	Essais bleu de méthylène LC 21-255	Forage, caractérisation et essai LC 21-255 (si nécessaire) du sol	Sensibilité à l'humidité des matériaux du sol support
		<u>Évaluation des infrastructures</u>		
OV	1	Observation visuelle	Relevé de la position verticale des conduites sous la chaussée et vérification interne des conduites (si nécessaire et possible)	Faible profondeur des conduites
HIST+OV	2	Historique des interventions connues	Vérification interne des conduites avec les systèmes d'inspections spécialisés ou l'historique des interventions sur les réseaux enfouis.	Mauvais état des services enfouis
				C5-B) Structures souterraines
OV	1	Observation visuelle	Vérification visuelle de la section du revêtement	Diminution de la section du revêtement
OV	2	Observation visuelle	Vérification interne visuelle des structures	Déplacement du cadre
OV	3	Observation visuelle	Vérification interne visuelle des structures	Perte de matériaux
OV	4	Observation visuelle	Vérification interne visuelle des structures	Désagrégation de la cheminée
OV	5	Observation visuelle	Vérification interne visuelle des structures	Impacts dynamiques

Essais préconisés pour affirmer les causes potentielles

Nom de l'essai	Ordre d'exécution des essais	Essais préconisés	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés	Cause à affirmer
----------------	------------------------------	-------------------	--	------------------

<u>Évaluation des travaux antérieurs</u>				C6-A) Mauvaise mise en œuvre
OV	1	Observation visuelle	Vérification de la superficie des défauts observables	Excès de liant d'accrochage
OV	2	Observation visuelle	Vérification de la macro-rugosité de l'enrobé. Vérification de l'historique des intempéries et des phases de construction	Ségrégation à la pose
HIST+OV	3	Historique et observation visuelle	Vérification des étapes de construction ou hypothèse des phases de construction dans le contexte d'origine jusqu'à aujourd'hui	Mauvais joint de construction
CAR+OV	4	Historique et observation visuelle	Carottage d'une fissure typique et observation de la pénétration de la fissuration dans l'enrobé et dans les couches granulaires	Remontées de fissure
LC _E	5	Récupération du bitume LC 25-001 et recouvrance d'élasticité LC 25-005	Prélèvement d'un échantillon représentatif, récupération du bitume LC 25-001 et réalisation de l'essai de détermination de la plage PG du bitume ou de recouvrance d'élasticité LC 25-005	Surchauffage de l'enrobé

Essais préconisés pour affirmer les causes potentielles

Nom de l'essai	Ordre d'exécution des essais	Essais préconisés	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés	Cause à affirmer
(C 6-B) Compaction des couches				
HIST+OV	1	Historique de construction	Vérification des étapes de construction ou hypothèse des phases de construction dans le contexte d'origine et/ou vérifier l'uni de l'enrobé et la micro-fissuration observable à la surface	Méthode de compaction inadéquate
FWD	2	Essais au nucléodensimètre	Essais au nucléodensimètre à réaliser <i>in situ</i> sur toute la surface de l'enrobé du tronçon	Manque de compaction de l'enrobé
FWD	3	Essais de portance ou essais FWD rapprochés	Essais à réaliser in situ sur toute la surface du tronçon et vérification des tassements dans la trace de roues	Manque de compaction de la structure
(C 6-C) Mise en place de l'enrobé				
OV	1	Observation visuelle	Vérification historique pour un changement de vocation ou par rapport aux normes actuelles pour les véhicules	Largeur de voie trop étroite
OV	2	Observation visuelle	Vérification de l'historique des intempéries et des phases de construction	Remblayage incomplet
CAR+OV	3	Carottage et observation visuelle	Vérification des étapes de construction ou hypothèse des phases de construction dans le contexte d'origine jusqu'à aujourd'hui et/ou carottage et caractérisation des matériaux de la transition	Transition inadéquate
CARACT	4	Carottage et caractérisation	Prélèvement d'un échantillon représentatif et caractérisation des matériaux de la structure en place actuellement	Présence de matériaux inadéquats

Essais possibles pour valider les causes spécifiques potentielles

Les essais préconisés pour chacune des causes sont soulignés

Familles de causes	Description de la cause	Essais proposés par guide LC ou autres	Essais Européen (essais français)	Essais proposés aux cours de l'ETS	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés
Famille n°1 - Enrobés bitumineux					
CT-A Mauvaise formulation					
	Sous ou surdosage et/ou mauvaise formulation	Détermination de la teneur en bitume LC 26-100	(Extraction et pénétrabilité à l'aiguille ou pseudo-viscosité STV)	Teneur en bitume et mélange à caractériser	Les essais LC 26-110 et LC 26-150 sont nécessaires à la caractérisation
	Agrégat hydrophile ou bitumophobe et/ou trop arrondie	Caractériser mélange et pourcentage de particule fracturée LC 21-100	(Indice de forme et polissage)	Mélange à caractériser et essai d'angularité	Historique de construction nous informera de la provenance des granulats
	Mauvais enrobage	Teneur en eaux des granulats LC-065 ou 066 ou 067	(Essais DURIEZ et VIALIT)	Mélange à caractériser	La récupération des granulats est la partie la plus complexe à réaliser
	Déficience en vide	Pourcentage de vide et compacité LC 26-320	(Extraction et essais Marshall et/ou essais d'abrasion)	Mélange à caractériser	Le carottage est nécessaire à l'extraction de l'échantillon
CT-B Stabilité de l'enrobé					
	Stabilité par temps chaud	Récupération du bitume LC 25-001 et recouvrance d'élasticité LC 25-005	(Extraction et point de ramollissement et essais DSR)	Détermination de la plage PG du bitume	Récupération du bitume LC 25-001 à effectuer avant les essais de détermination de la plage PG du bitume
	Zone de sollicitation accrue	Observation visuelle	<i>indéterminé</i>	Observation visuelle	Les déformations du revêtement se présentent perpendiculairement au sens du trafic et sous forme de bosse de type "planche à laver"
CT-C Épaisseur et adhérence interne					
	Épaisseur insuffisante	Utilisation actuelle vs vocation historique	<i>indéterminé</i>	Carottage et observation visuelle	Recherche historique à réaliser
	Adhérence des couches	Appareil de traction hydraulique MTQ	(Essais VIALIT et DURIEZ)	Vérification du trafic et observation visuelle	Vérification du type de trafic vs historique
	Sous-dimensionnement de l'épaisseur	Méthode YONAPAVE	Essais de portance et vérification de l'épaisseur fonction du trafic	Essais de portance et vérifier le nombre structural de l'AASHTO	Calculer le nombre structural total pour le trafic actuel vs le SN actuel estimé par les essais du type FWD

Essais possibles pour valider les causes spécifiques potentielles

Les essais préconisés pour chacune des causes sont soulignés

Familles de causes	Description de la cause	Essais proposés par guide LC ou autres	Essais Européen (essais français)	Essais proposés aux cours de l'ETS	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés
C1-D Usure et vieillissement					
	Usure due au trafic	Polissage des granulats LC 21-102	(Essais orniéreurs, pendule SRT - British Pendulum Number)	<u>Orniereur et observation visuelle</u>	Vérification visuelle des granulats et des déformations de surfaces dans les pistes de roues
	Retrait thermique et fissuration ou fragilisation du bitume	Détermination du module complexe LC 26-700	(Point de ramollissement et essais BBR)	<u>Plage PG du bitume ou essais de retrait empêché</u>	Récupération du bitume LC 25-001 à effectuer avant les essais sur la plage PG du bitume
	Fatigue du revêtement	Caractéristiques - calcul de divers facteurs LC-26-900	(Essais orniéreurs)	<u>FWD et vérification du bassin de déformation</u>	L'étendue du bassin de déflexion représente une indication de la fatigue du revêtement
C2-A Capacité insuffisante Famille n°2 - Structure de chaussées					
	Capacité portante insuffisante	Détermination du module Mr LC-22-400	Road Rater ou autres	<u>Essais de portance FWD</u>	Vérification de la portance par rapport au trafic estimé actuellement
	Dégel et capacité structurale insuffisante	<u>FWD printemps vs été</u>	(Équivalent de sable et sensibilité au gel)	Essais de portance printemps vs été	Vérification de la portance au printemps vs la portance relevée en été
	Faiblesse ponctuelle	<i>indéterminé</i>	Road Rater (essais rapprochés)	<u>Observation visuelle</u>	Essais de portance avec un camion chargé et/ou observation ponctuelle
C2-B Comportements différentiels					
	Hétérogénéité des couches	<u>Historique, carottage et observation visuelle</u>	(Équivalent de sable et essai bleu méthylène)	Sonde et géoradar	Carottage et caractérisation des couches de matériel, si nécessaire
	Discontinuité de la structure	<u>Historique et Observation visuelle</u>	<i>indéterminé</i>	Essais de portance rapprochés	Vérification des étapes de construction
	Retrait thermique	Valeur au bleu de méthylène LC 21-224	<i>indéterminé</i>	<u>Carottage et observation visuelle</u>	Observation de la fissuration dans les couches granulaires vs dans l'enrobé
	Comportement gélif	Valeur au bleu de méthylène LC 21-225	(Équivalent de sable et sensibilité au gel)	<u>Observation de la neige en bordure de la route</u>	Section de chaussée exposée à la pénétration différentielle du gel
	Consolidation et tassements	<u>Observation visuelle</u>	<i>indéterminé</i>	Sonde et géoradar	Vérification des dépressions dans toute l'emprise du tronçon

Essais possibles pour valider les causes spécifiques potentielles

Les essais préconisés pour chacune des causes sont soulignés

Familles de causes	Description de la cause	Essais proposés par guide LC ou autres	Essais Européen (essais français)	Essais proposés aux cours de l'ETS	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés
C2-C Usure et fatigue structurale					
	Fatigue structurale	<u>FWD et SN de l'AASHTO</u>	<i>indéterminé</i>	Essais de portance	Portance de la structure actuelle vs celle nécessaire au trafic estimé
	Usure des matériaux	<u>Pourcentage d'usure Micro-Deval LC 21-101 et LC 21-070 ou Los Angeles LC 21-400</u>	(Essais Los Angel et Micro-Deval)	Extraction et essais d'abrasion	Carottage des couches granulaires, granulométrie et caractérisation des matériaux dans l'état actuel
C3-A Drainage de surface Famille n°3 - Drainage					
	Écoulement des eaux	<i>indéterminé</i>	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle</u>	Vérification des accumulations d'eau
	Efficacité du système de drainage	<i>indéterminé</i>	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle</u>	Vérification des accumulations d'eau dans les réseaux souterrains
	Infiltration d'eau dans la structure	Essais du potentiel de succion des sols	(Teneur en eaux et Équivalent de sable)	<u>Observation visuelle</u>	Vérification des ouvertures, sur la surface de l'enrobé, propice à l'infiltration d'eau
C3-B Drainage interne de la structure					
	Drainage des couches granulaires	Potentiel de succion des sols LC 22-330	(Teneur en eaux et équivalent de sable)	<u>Matériaux fins et densité élevée</u>	Carottage et caractérisation des couches granulaires
	Apport latéral en eaux de ruissellement	Teneur en eaux LC 21-199	(Teneur en eau et granulométrie)	<u>Observation visuelle</u>	Observation des pentes d'écoulement naturelles de l'environnement avoisinant
	Assèchement du sol support	Teneur en eaux LC 21-200	<i>indéterminé</i>	<u>Forage et teneur en eau</u>	Forage dans le sol support
	Mouvement hydraulique et/ou affouillement	<u>Écoulement des granulats fins LC 21-075</u>	(Essais DURIEZ - enrobé)	Retrait dû au cycle de mouillage	Carottage et caractérisation des couches granulaires

Essais possibles pour valider les causes spécifiques potentielles

Les essais préconisés pour chacune des causes sont soulignés

Familles de causes	Description de la cause	Essais proposés par guide LC ou autres	Essais Européen (essais français)	Essais proposés aux cours de l'ETS	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés
C4-A Nature du sol support					
	Remblai et/ou déblai	<u>Historique, forage et observation visuelle</u>	<i>indéterminé</i>	Forage et caractérisation	Observation visuelle de la topométrie des terrains avoisinants et forage
	Sol argileux ou marécageux	Forage et caractérisation	Essais bleu méthylène	<u>Historique et observation visuelle</u>	Connaissance des sols avoisinants afin de proposer un type de sol support
	Instabilité du remblai	<u>Calcul du Mr ponctuel vs le Mr moyen du sol</u>	<i>indéterminé</i>	Essais de portance et observation visuelle	FWD sur un échantillon typique de la chaussée vs FWD à l'endroit instable
C4-B Support latéral					
	Relâchement ou perte de support latéral	<i>indéterminé</i>	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle</u>	Vérification visuelle des glissements de terrains naturels avoisinants
	Manque de support latéral derrière les bordures	<i>indéterminé</i>	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle</u>	Dépression observable au dos des bordures
C4-C Sensibilité au gel du sol support					
	Effet récurrent des cycles de gel et de dégel	<i>indéterminé</i>	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle printemps vs été</u>	Observation de l'ouverture des fissures au printemps vs en été pour le tronçon
	Géivité du sol support	Valeur au bleu de méthylène LC 21-225 ou Essais du potentiel de ségrégation SP (MTQ)	(Essai sensibilité au gel)	<u>Matériaux fins, limite de liquidité et densité élevée</u>	Historique de construction et/ou forage et caractérisation du sol support
C4-D Humidité du sol support					
	Niveau de la nappe phréatique	<u>Informations connues et observables</u>	<i>indéterminé</i>	Forage et observation visuelle	Observation du niveau de la nappe phréatique près du tronçon à évaluer
	Sensibilité à l'humidité des matériaux du sol support	<u>Essais bleu de méthylène LC 21-255</u>	Essais bleu méthylène	Essais de cycle de mouillage des matériaux	Forage et caractérisation du sol support

Essais possibles pour valider les causes spécifiques potentielles

Les essais préconisés pour chacune des causes sont soulignés

Familles de causes	Description de la cause	Essais proposés par guide LC ou autres	Essais Européen (essais français)	Essais proposés aux cours de l'ETS	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés
C5-A	Conduites souterraines	Famille n°5 - Infrastructures souterraines			
	Faible profondeur des conduites	<u>Observation visuelle</u>	<i>indéterminé</i>	Historique	Vérification interne des conduites
	Mauvais état des services enfouis	<u>Historique des interventions connues</u>	<i>indéterminé</i>	Observation visuelle	Vérification interne des conduites
C5-B	Structures souterraines				
	Impacts dynamiques	<i>indéterminé</i>	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle</u>	Vérification interne des structures
	Déplacement du cadre	<i>indéterminé</i>	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle</u>	Vérification interne des structures
	Perte de matériaux	<i>indéterminé</i>	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle</u>	Vérification interne des structures
	Diminution de la section du revêtement	<i>indéterminé</i>	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle</u>	Vérification visuelle de la section du revêtement
	Désagrégation de la cheminée	<i>indéterminé</i>	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle</u>	Vérification interne des structures
C6-A	Mise en place de l'enrobé	Famille n°6 - Travaux antérieurs			
	Ségrégation à la pose	Carottage et observation	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle</u>	Vérifier la macro-rugosité de l'enrobé
	Mauvais joint de construction	<i>indéterminé</i>	<i>indéterminé</i>	<u>Historique et observation visuelle</u>	Historique de construction - hypothèse de construction et observation
	Remontées de fissure	<u>Historique et observation visuelle</u>	<i>indéterminé</i>	Carottage et observation visuelle	Intervention de réhabilitation à répertorier dans le temps
	Excès de liant d'accrochage	<i>indéterminé</i>	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle</u>	Superficie des défauts observables
	Surchauffage de l'enrobé	Récupération du bitume LC 25-001 et recouvrance d'élasticité LC 25-005	(Extraction et point de ramollissement et essais DSR)	Extraction et essais de pénétration	Carottage et extraction du bitume à réaliser avant l'essai d'élasticité

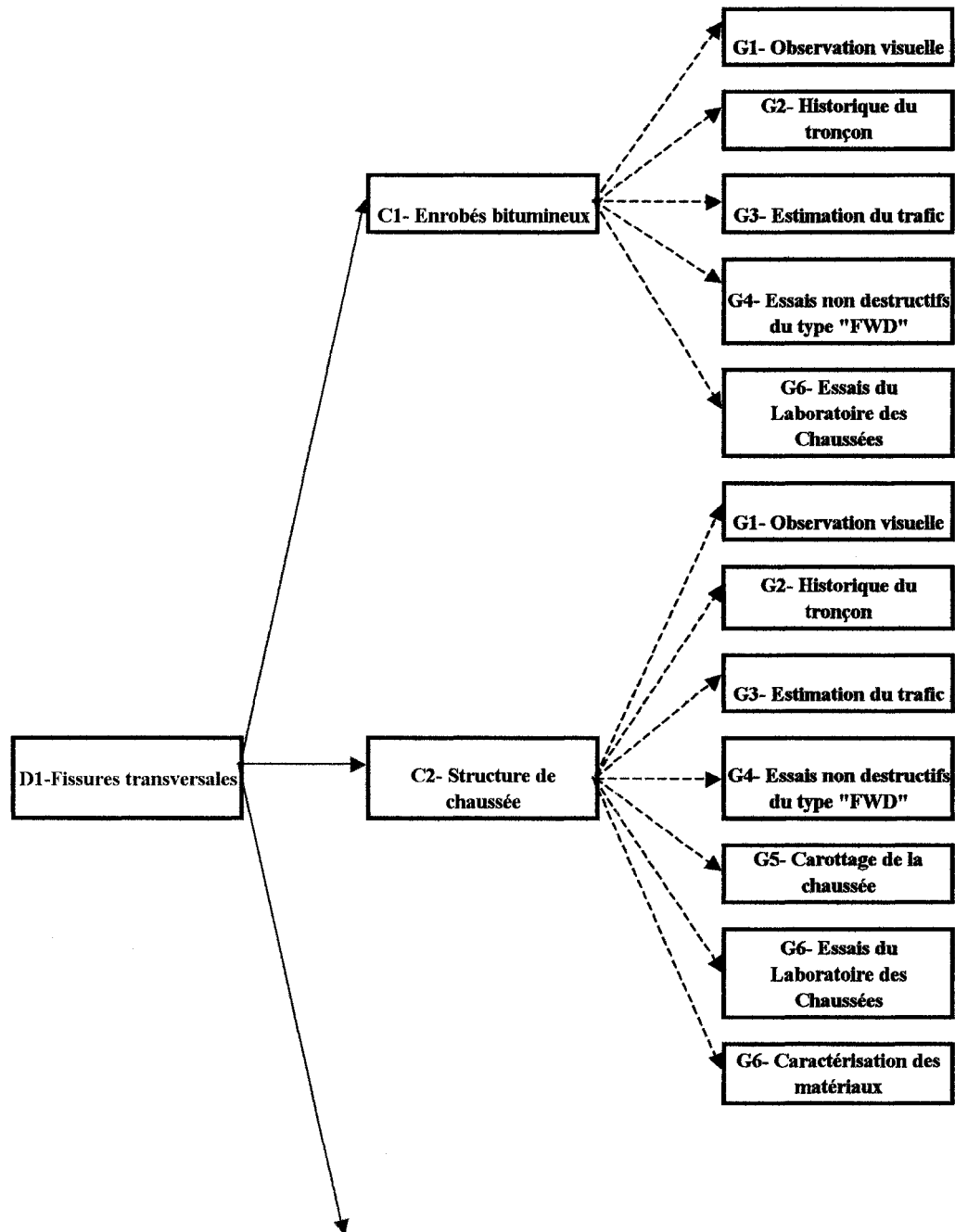
Essais possibles pour valider les causes spécifiques potentielles

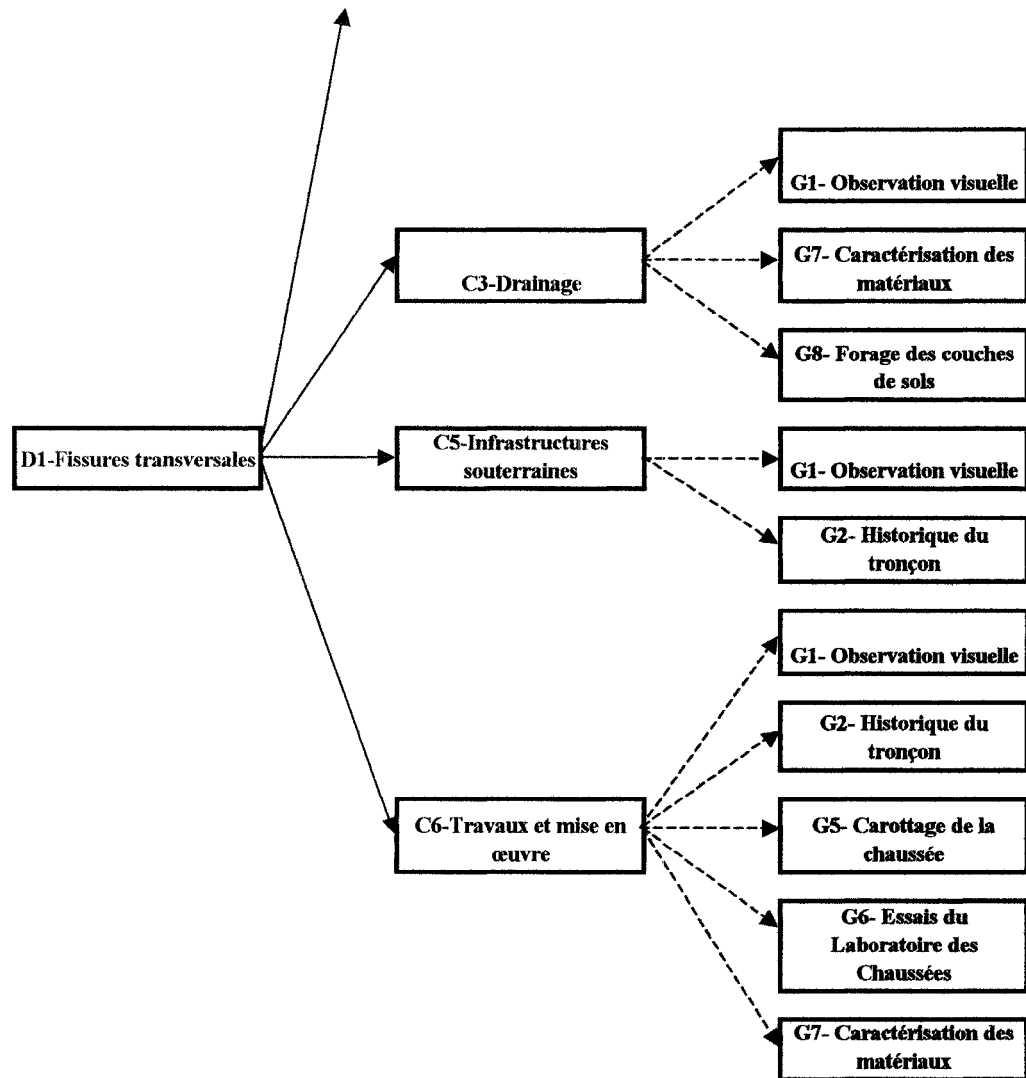
Les essais préconisés pour chacune des causes sont soulignés

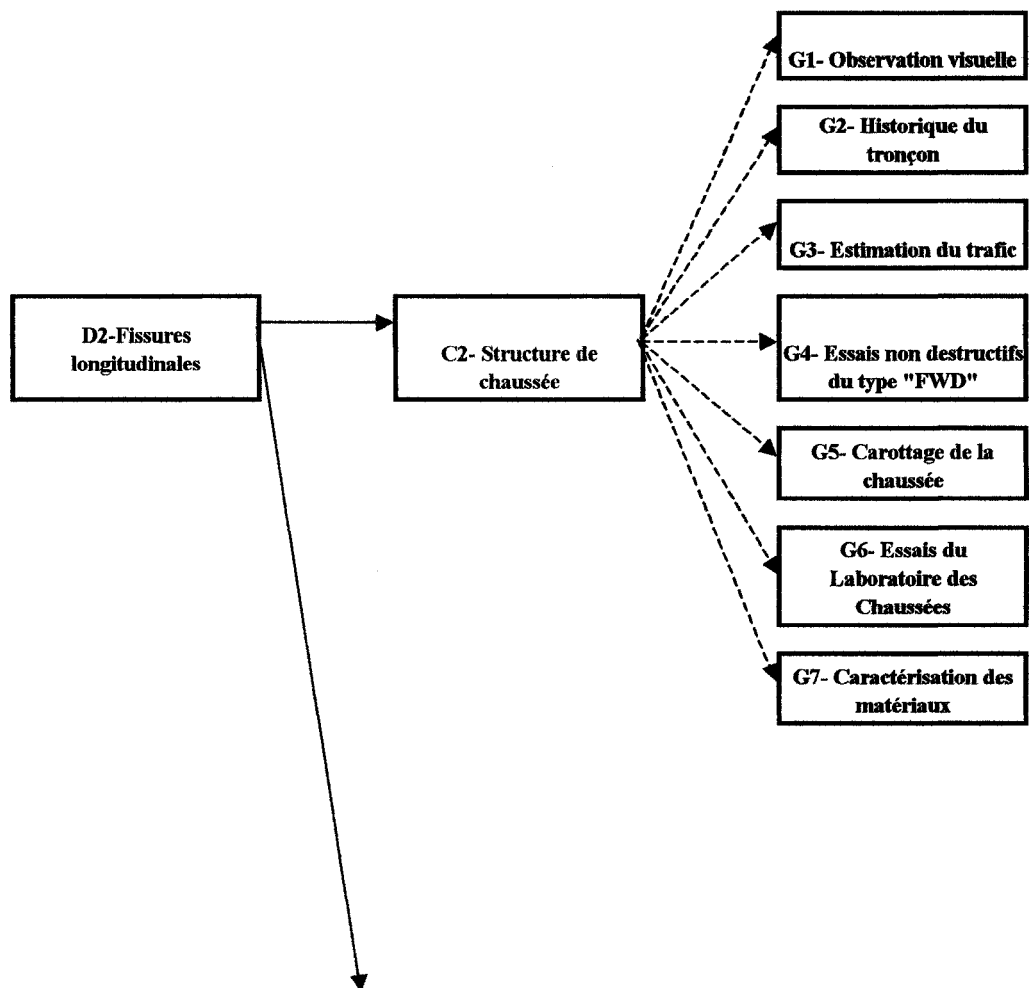
Familles de causes	Description de la cause	Essais proposés par guide LC ou autres	Essais Européen (essais français)	Essais proposés aux cours de l'ETS	Commentaires sur les essais affirmatifs préconisés
C6-B Compaction des couches					
	Méthode de compaction inadéquate	<u>Historique de construction</u>	<i>indéterminé</i>	Essais de portance rapprochés (FWD)	Vérifier l'uni de l'enrobé et la micro-fissuration observable à la surface
	Manque de compaction de l'enrobé	Masse volumique in situ LC 26-500 et 26-510	Essais Marshall	<u>Essais au nucléodensimètre</u>	Essais à réaliser <i>in situ</i>
	Manque de compaction de la structure	Analyse granulométrique et Proctor modifié	(Teneur en eau et granulométrie)	<u>Essais de portance ou essais FWD rapprochés</u>	Essais à réaliser <i>in situ</i> , vérification des tassements dans la trace de roues
C6-C Mauvaise mise en oeuvre					
	Transition inadéquate	Déterminer la masse volumique LC 21-060	Vérification de la masse volumique des matériaux	<u>Carottage et observation visuelle</u>	Vérification des tassements vs les phases de construction connues ou supposées
	Remblayage incomplet	<i>indéterminé</i>	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle</u>	Historique - intempéries de construction
	Largeur de voie trop étroite	Vérification vs normes	<i>indéterminé</i>	<u>Observation visuelle</u>	Vérifier pour un changement de vocation
	Présence de matériaux inadéquats	Composition - matériaux recyclés LC 21-901	<i>indéterminé</i>	<u>Carottage et caractérisation</u>	Assurer d'avoir un échantillon représentatif de la structure en place

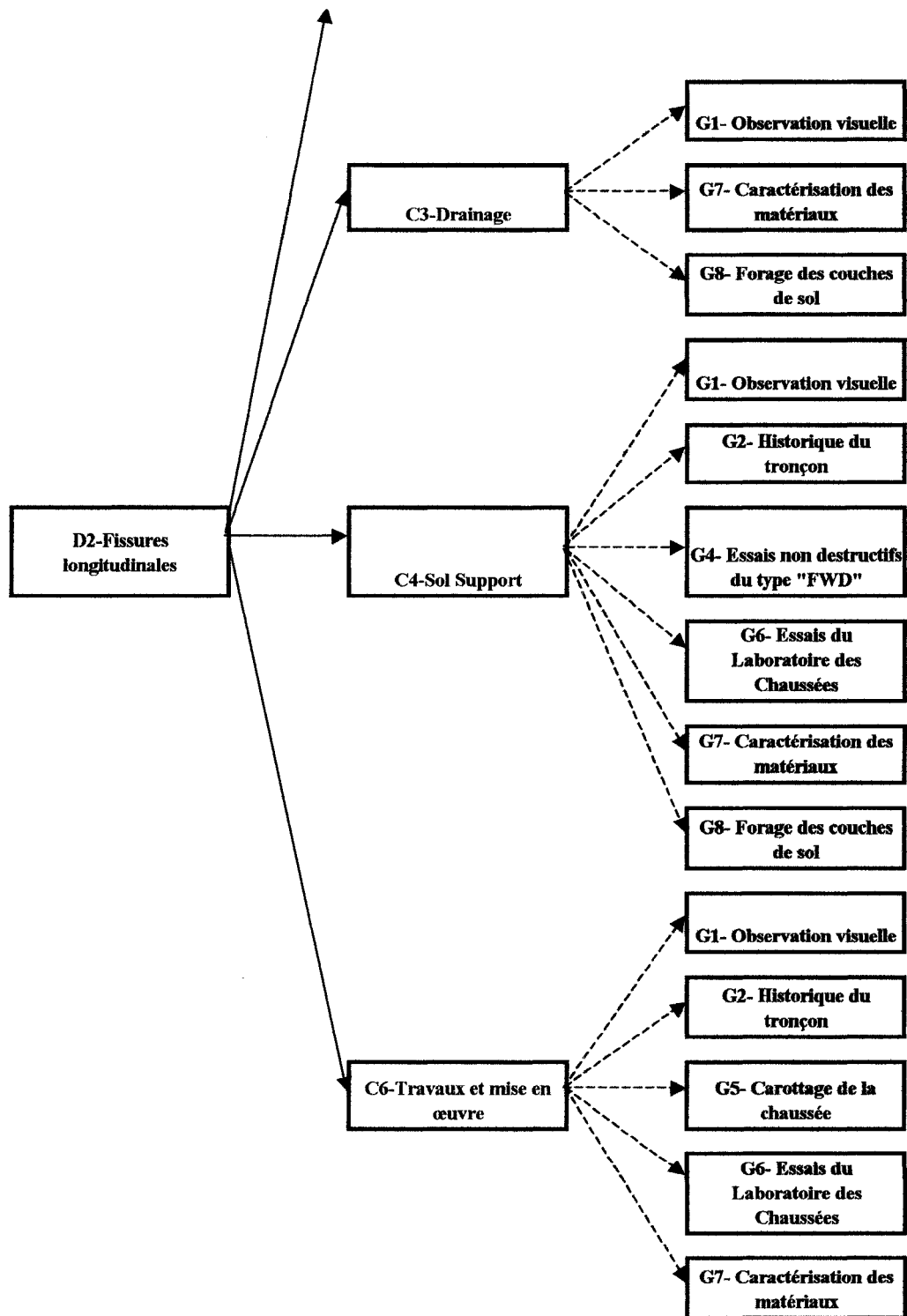
ANNEXE II

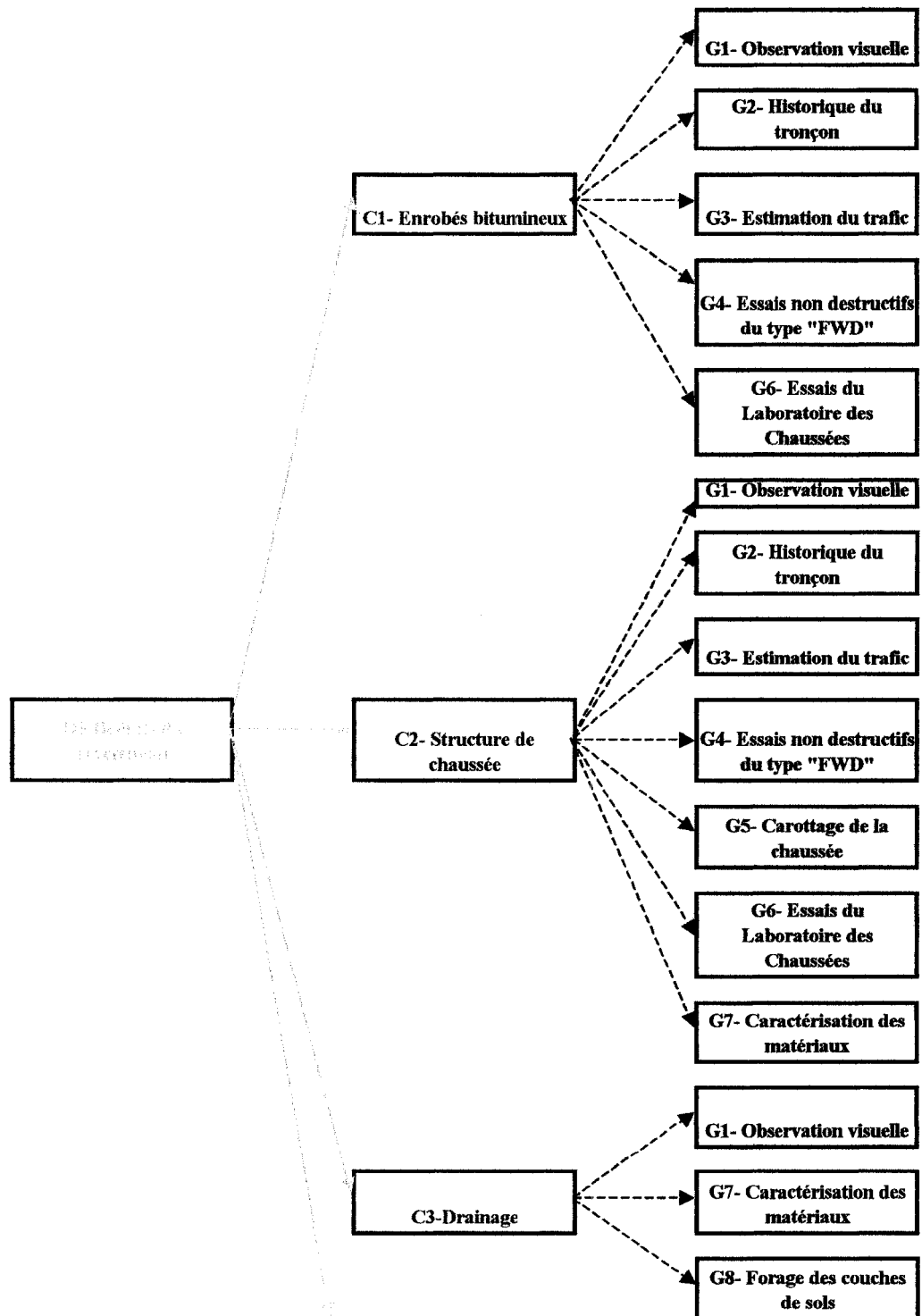
ORGANIGRAMME DE LIAISON ENTRE LES FAMILLES DE DÉFAUTS ET LES GROUPES D'ESSAIS

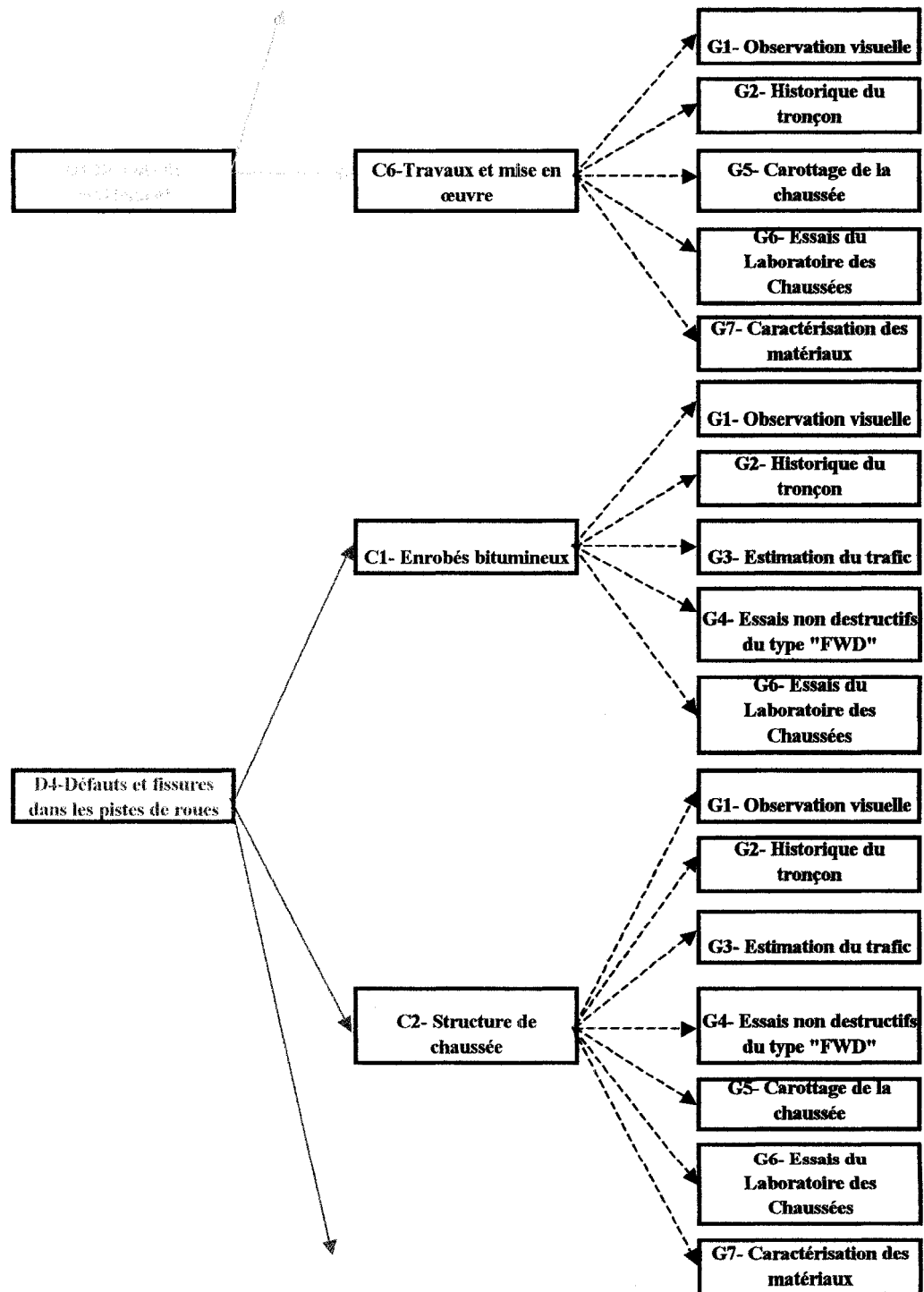


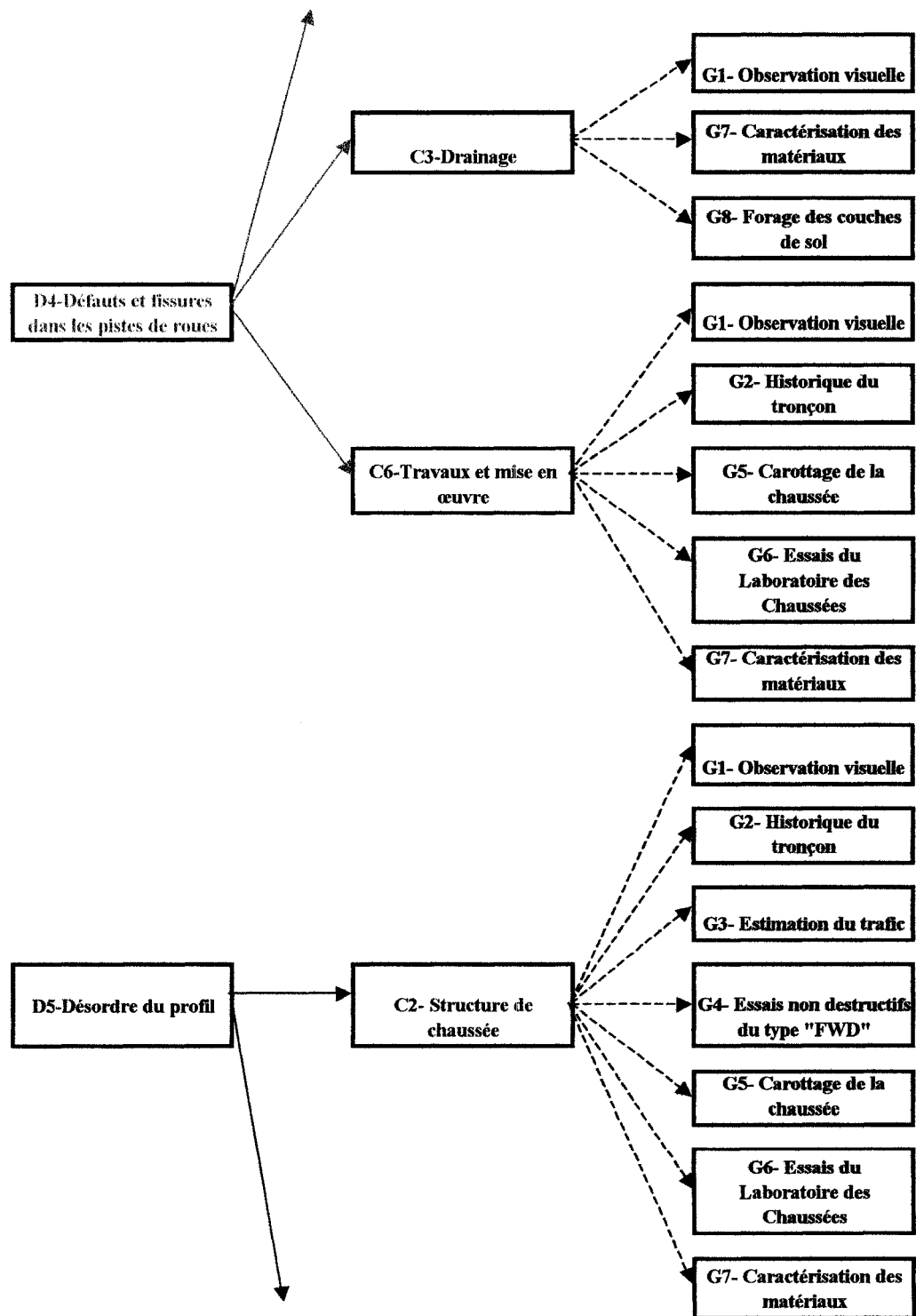


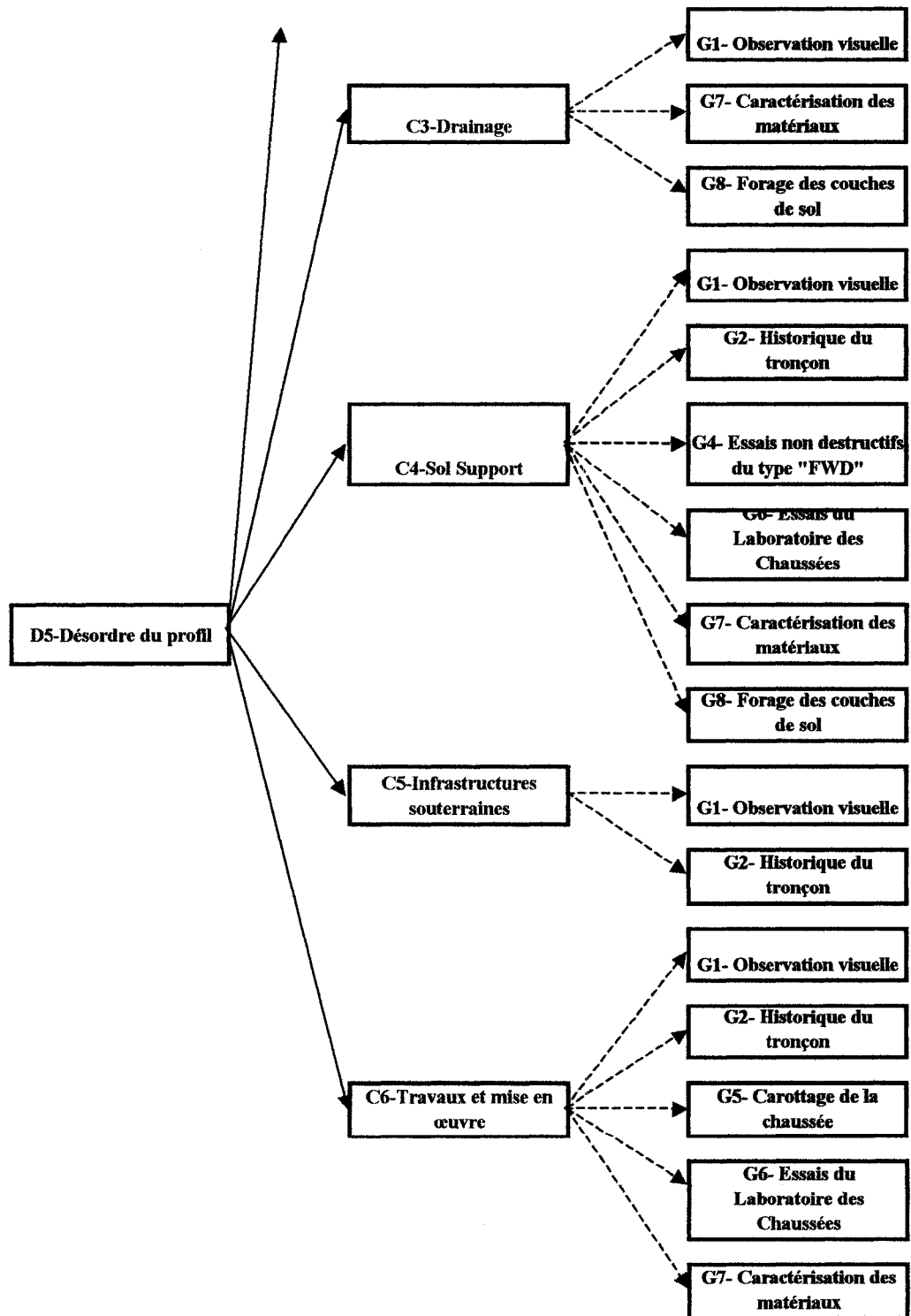












BIBLIOGRAPHIE

- American Association of State Highway and Transportation Officials. 2007. *A project proposal for the developpement of a Maintenance/Asset Management System M/AMS*. En ligne. <http://aashtoware.org/sites/aashtoware/docs/MAMS_Proposal_FINAL-081905.pdf> Consulté en ligne le 15 février 2007.
- Asphalte Institute. 1987. *Cause and Prevention of Stripping in Asphalte Pavements*, (ES-10). College Park, Maryland. The Asphalte intitute. 8 p.
- Assaf, Gabriel .J. 2004. *MGC-835 : Évaluation des chaussées*. Notes du cours MGC-835 du programme de Maîtrise en génie de la construction, Montréal (QC): École de Technologie Supérieure.
- Assaf, Gabriel J. 2004. *CTN-710 : Techniques et gestion de l'entretien des réseaux routiers*. Notes du cours CTN-710 du programme de Baccalauréat en génie de la construction, Montréal : École de Technologie Supérieure.
- Assaf, Gabriel J. 2003. *MGC-840 : Conception et réhabilitation des chaussées*. Notes du cours MGC-840 du programme de Maîtrise en génie de la construction, Montréal (QC): École de Technologie Supérieure.
- Assaf, Gabriel J. 1987. *A.G.I.R. Project (Auscultation et gestion des infrastructures routière or Road infrastructure inspection and management)*. Québec : ministère des Transports du Québec. Présentation inédite.
- Association des Ingénieurs-Conseil du Québec. En ligne. <<http://www.aicq.qc.ca>> Consulté en ligne le 5 avril 2007.

- Boucher, Martin. 1994. « Revue générale et comparaison de systèmes de gestion des chaussées. » Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 192 p.
- Boutonnet, Michel. Savard, Yves. Lerat, Patrick. St-Laurent, Denis. Pouliot, Nadia. 2003. «Thermal Aspect of Frost-Thaw Pavement Dimensioning». *Transportation Research Record n° 1821*, p. 3-12.
- Brière, François. 1997. *Distribution et Collecte des Eaux*, édition revue et augmentée. Montréal (QC) : Édition de l'école de la Polytechnique de Montréal, 365 p.
- Bruxelles, Claude. 2005. *CTN-535 : Construction et dimensionnement des chaussées*. Notes du cours CTN-535 du programme de Baccalauréat en génie de la construction, Montréal : École de Technologie Supérieure.
- Cazavant, Alain. 2004 «Comprendre le Cycle de Vie des Infrastructures et l'Intervention Appropriée». *INFRA – CERIU 2004, Recueil des Communications / Proceedings*. (Montréal, 15 au 17 novembre 2004) Montréal (QC) : Centre d'expertise et de recherche en infrastructure urbaine (CERIU). Présentation inédite.
- Ceratti, John A., Nunez, Washington P., Gehling, Wai Y.Y. & Oliveira, José A. 2000. «Rutting of thin Pavements Full-Scale Study». *Transportation Research Record n° 1716*, p. 82-88.
- Chen, Dar-Hao. Wang, Jian-Neng. & Bilyeu, John. 2001. «Application of Dynamic Cone Penetrometer in Evaluation of Base and Subgrade Layers». *Transportation Research Record n° 1860*, p. 1-10.

- Chen, Dar-Hao. Bilyeu, John. Walker, Deborah. & Murphy, Mike. 2001. «Study of Rut-Depth Measurements». *Transportation Research Record n° 1764*, p. 78-88.
- Cook, Mike C., Seeds, Stephen B., Haiping, Zhou. and Hicks, R. Gary. 2004. «Guide for investigating and Remediating Distress in Flexible Pavements» *Transportation Research Record n° 1896*, p. 147-161.
- Côté, Jean., Roy, Marius. 1998. *Conductivité hydraulique de matériaux de fondations de chaussées partiellement saturés*, Québec. : Études et Recherches en Transports – Direction du Laboratoire des Chaussées, ministère des Transports du Québec. 123p.
- Direction du Laboratoire des Chaussées. 2005. *Recueil des Méthodes d'essai LC*, 9^e mise à jour. Québec : Service de qualité et des normes, Les publications du Québec, Gouvernement du Québec.
- De Beer, M. 2006. «Reconsideration of tyre-pavement input parameters for structural design of flexible pavements». *ISAP 2006, 10^e Conférence internationale sur les chaussées souples*. (Québec, 12 au 17 août 2006) Québec (QC) : International society for asphalt pavements. Présentation inédite.
- Deacon, John A., Harvey, John T. Guada, Irwin, Popescu, Lorina. & Monismith, Carl L. 2002. «Analytically Based Approach to Rutting Prediction». *Transportation Research Record n° 1716*, p. 9-18.
- Dessau-Soprin inc. 2003. *Cahier des Charges Spéciales pour la Construction des Rues*, édition révisée le 31 juillet 2003, Laval, (Qc). Dessau-Soprin Inc. 120 p. Consulté sur place en 2007.

- Dynatest International A/S. 2007. *Dynatest FWD/HWD Test Systems*. En ligne <http://www.dynatest.com/hardware/fwd_hwd.htm> Consulté en ligne le 15 décembre 2006.
- George, K.P., Bajracharya, Maril. & Stubstad, Richad. 2004. «Subgrade Characterization Employing the Falling Weight Deflectometer». *Transportation Research Record n° 1869*, p. 73-79.
- Goodman, Stephen N. 2001. «Assessing Variability of subgrade Distress Surveys in Canadian Long-Term Pavement Performance Program». *Transportation Research Record n° 1764*, p. 112-118.
- Haas, Ralph. Hudson, W.Ronald. & Zaniewski, John. 1994. *Modern Pavement Management*, édition originale basé sur *Pavement Management Systems*. Malabar, Floride : Krieger publishing company, 583 p.
- Hoffman, Mario S. 2003. «Direct Method for Evaluating Structural Needs of Flexible Pavements with Falling-Weight Deflectometer Deflections». *Transportation Research Record n° 1860*, p. 41-47.
- Hoffmann, Oliver J-M., Guzina, Bojan B., & Drescher, Andrew. 2004. «Stiffness Estimates Using Portable Deflectometers», *Transportation Research Record n° 1869*, p. 59-72
- Holtz, Ronald. D., Kovacs, William. D. 1991. *Introduction à la géotechnique*. Montréal, (Qc) : École de Polytechnique de Montréal, 808 p.
- Kothandram, Sathyanarayanan. Ioannides, Anastasios M. 2001. «DIPLODEF A Unified Backcalculation System for Asphalt and Concrete Pavements». *Transportation Research Record n° 1764*, p. 20-29.

- Ksaibati, Khaled. Armaghani, Jamshid. & Fisher, Jason. 2000. «Effect of Moisture on Modulus Values of Base and Subgrade Materials». *Transportation Research Record n° 1716*, p. 20-29.
- Lavoie, Stéphane. Loranger, François. 2004. *Étude de réhabilitation des chaussées, Diverses rues – Programme 2004, Ville de Blainville, Québec*. Laval, (Qc) LVM-Fondatec inc., 29 p.
- Lavoie, Stéphane. Parent, Michel. 2005. *Réfection du rang Lepage – Étude réhabilitation de chaussées*. Laval, (Qc) : LVM-Fondatec inc., 19 p.
- Lavoie, Stéphane., Parent, Michel. 2004. *Réfection de la 58^{ième} Avenue, Rivière-des-Prairies, Montréal, Québec – Études de réhabilitation, Gestion des chaussées*. Laval, (Qc) : LVM-Fondatec inc., 26 p.
- Lemire, Maurice. 2004. «Dégradation autour des accès aux services et méthodes de réfection». *INFRA – CERIU 2004, Recueil des Communications / Proceedings*. (Montréal, novembre 15 au 17 2004) Montréal (QC) : Centre d'expertise et de recherche en infrastructure urbaine (CERIU). Présentation inédite.
- Les Consultants Dessau Inc. 1980 *Cahier des Charges Spéciales pour la Construction des Routes*, édition révisée le 10 mars 1982, Laval (Qc). Les consultants Dessau Inc. 88 p. Consulté sur place en 2007.
- Ministère des Transports du Québec. 2006. *Contexte Particulier des chaussées au Québec*. En ligne <<http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/reseau/chaussees/index.asp>> Consulté en ligne le 12 janvier 2006.

Ministère des Transports du Québec. 2006. *Logiciel de dimensionnement des chaussées*. En ligne <<http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/reseau/chaussees/logiciel.asp>> Consulté en ligne le 12 janvier 2006.

Ministère des Transports du Québec. 2006. *Info, Direction du Laboratoire des Chaussées – Bulletin d'information technique (1995 à 2005)* En ligne <<http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/publications/reseau/infodlc/index.asp>> Consulté en ligne le 12 janvier 2006.

Ministère des Transports du Québec. 2002. *Manuel d'Identification des Dégradations des Chaussées Flexibles*. Projet. Québec : Gouvernement du Québec : 52 p.

Moghadasnejad F., Toolabi, S. 2006 «F.E. Study of critical cracking conditions in Asphalt overlay». *ISAP 2006, 10^e Conférence internationale sur les chaussées souples*. (Québec, 12 au 17 août 2006) Québec (QC) : International society for asphalt pavements. Présentation inédite.

Mun Park, Hee. Kim, Y. Richard. 2003. «Prediction of Remaning Life of Asphalte Pavement with Falling-Weight Deflectometer Multiload-Level Deflections». *Transportation Research Record n° 1860*, p. 48-56.

Orr, David P., 2003. «Detection of Nonresilient Behavior in Pavements with a Falling-Weight Deflectometer». *Transportation Research Record n° 1860*, p. 26-32.

Parvini, Mehdi., 2001. «Increasing Life Cycles pf Pavement Structures by Lane Shifting». *Transportation Research Record n° 1764*, p. 176-179.

Pehlivanidis, M. 1994. *ARC : An Expert Inspection System for Road Repairs*. Québec (QC): Université de Montréal, Centre de Recherche sur les Transports. Ouvrage inédit.

- Perraton, Daniel. 2002. *MGC-805 : Matériaux de construction*. Notes du cours MGC-840 du programme de Maîtrise en génie de la construction, Montréal : École de Technologie Supérieure.
- Pologruto, Michael. 2001. «Procedure for Use of Falling Weight Deflectometer to Determine AASHTO Layer Coefficients». *Transportation Research Record n° 1764*, p. 11-19.
- Programme d'Infrastructure Québec. 2003 «La voirie urbaine au Québec – Étude réalisée dans le cadre du programme d'Infrastructure-Québec». *INFRA – CERIU 2003, Recueil des Communications / Proceedings*. (Montréal, 17 au 19 novembre 2003) Montréal (QC) : Centre d'expertise et de recherche en infrastructure urbaine (CERIU).
- Roque, Renaldo. Myers, LeslieAnn. & Birgisson, Bjorn. 2000. «Evaluating Measured Tire Contact Stresses to Predict Pavement Response and Performance». *Transportation Research Record n° 1716*, p. 73-81.
- St-Laurent, Denis. 2004. «Analyse mécanique des chaussées et rétrocalcul des modules». *MGC-840 : Conception et réhabilitation des chaussées*. Présentation inédite dans le cours MGC-840 du programme de Maîtrise en génie de la construction, Montréal : École de Technologie Supérieure.
- Statistique Canada, Organisme statistique national du Canada, CANSIM. En ligne. <http://www.statcan.ca/francais/ads/cansimII/index_f.htm> Consulté en ligne le 25 octobre 2006.

- Strategic Highway Research Program. 1990. *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Studies*, Washington, D.C., National Research Council, 73 p.
- Stubstad, R.N. Jiang, Y.J. Clevenson, M.L. and Lukanen, E.O. 2006. «Review of the Long-Term Pavement Performance Backcalculation Results—Final Report». En ligne. <<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/ltp>> Consulté en ligne le 24 octobre 2006.
- Tessier, G.-Robert. 1990. *Guide de Construction et d'Entretien des Chaussées*. Québec : Association québécoise du transport et des routes, 393 p.
- The American Association of State Highway and Transportation Officials. En ligne <<http://www.transportation.org>> Consulté en ligne le 10 février 2006.
- Zhang, Zhanmin. Wang, Feng. & Machemehl, Randy B. 2003 «Decision-Making Problem for Managing Pavement Maintenance and Rehabilitation Projects». *Transportation Research Record n° 1853*, p. 21-28.76-179.