

Établissement des modèles
de performance des chaussées



**MATÉRIAUX
ET INFRASTRUCTURES**



ÉTUDES ET RECHERCHES
EN TRANSPORT

**Établissement des modèles
de performance des chaussées**

**MATÉRIAUX
ET INFRASTRUCTURES**

**Philippe Lepert
Yves Savard
Diane Leroux**

**ÉTUDES ET RECHERCHES
EN TRANSPORT**

ÉTABLISSEMENT DES MODÈLES DE PERFORMANCE DES CHAUSSÉES

Rapport final

Projet de coopération franco-qubécois

Par

Philippe Lepert, ing.
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Yves Savard, ing., M. Sc.
Ministère des Transports du Québec

et

Diane Leroux, M. Sc., statisticienne
Ministère des Transports du Québec

Juin 2007

La présente étude a été réalisée dans le cadre du projet de coopération franco-québécois du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et la direction du Laboratoire des chaussées du ministère des Transports du Québec.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports du Québec.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec, 2007
ISBN 978-2-550-50374-3 (PDF)

Titre et sous-titre du rapport Établissement des modèles de performance des chaussées		N° du rapport Transports Québec RTQ-07-04	
		Date de publication du rapport (Année – Mois) 2007-06	
Titre du projet de recherche Établissement des modèles de performance des chaussées		N° du contrat (RRDD-AA-CCXX) S. O.	N° de projet ou dossier S. O.
Responsable de recherche Yves Savard et Philippe Lepert		Date du début de la recherche 2000-04-01	Date de fin de la recherche 2004-11-15
Auteur(s) du rapport Philippe Lepert, Yves Savard et Diane Leroux			
Chargé de projet, direction Yves Savard, Laboratoire des chaussées et Philippe Lepert, LCPC		Coût total de l'étude 725 000 \$	
Étude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme) Direction du Laboratoire des chaussées 930, chemin Sainte-Foy, 5^e étage Québec (Québec) G1S 4X9 et Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Route de Bouaye, B.P. 19 44340 Bouguenais, France		Étude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme) <i>Préciser DRE ou autre direction du MTQ</i>	
<p>Problématique Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et le ministère des Transports du Québec (MTQ) sont tous deux engagés dans des travaux d'étude et de recherche visant à déterminer des modèles de performance des chaussées. Ces modèles sont un élément clé dans les nouvelles méthodes de gestion de l'entretien des routes, notamment lorsqu'elles visent à optimiser l'emploi des budgets d'entretien sur plusieurs années. Lors d'échanges entre les professionnels du LCPC et du MTQ, il est ressorti que l'expérience acquise par ces deux organismes était complémentaire et qu'une collaboration pourrait aisément s'instaurer, au bénéfice des deux parties.</p>			
<p>Objectifs L'objectif de la coopération était de procéder en commun à l'exploitation des données recueillies par le MTQ sur ces sections en appliquant les méthodes déjà mises en œuvre au LCPC pour développer des modèles de performance. Ainsi, le MTQ pourrait tirer parti de l'expérience du LCPC, et celui-ci trouverait matière à approfondir son expertise à partir de données plus complètes et plus fiables.</p>			
<p>Méthodologie La méthodologie employée pour réaliser le projet comprend 3 phases :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Phase n° 1 : Définition de la méthodologie d'analyse combinant l'approche mécanique des chaussées et la statistique, sélection des données pour le développement des modèles et comparaison des systèmes de gestion des chaussées. - Phase n° 2 : Développement des modèles de performance à partir de la base de données des sections témoins, dans un premier temps, et sur la base de données des sections comportant un renouvellement de la couche de surface. - Phase n° 3 : Développement des méthodes d'analyse de performances sur la base de l'analyse coût-avantage sur plusieurs cycles d'intervention. 			
<p>Résultats et recommandations L'intérêt de coupler l'approche d'ingénierie en mécanique des chaussées à celle de la statistique pour développer les modèles de performance des chaussées a été démontré. Ce travail a conduit le LCPC à améliorer la méthode des lois de survie appliquée aux chaussées, qu'il avait développée précédemment, et à développer la méthode statistique indirecte, et le MTQ à mettre en œuvre la méthode de régression dite « non linéaire directe ». Le développement de modèles à partir de variables explicatives s'est révélé très efficace pour représenter le comportement réel des chaussées et analyser des stratégies d'intervention sur plusieurs cycles de vie. Le développement des modèles de performance devrait être étendu aux autres types d'intervention avec l'identification des variables explicatives pour les intégrer aux systèmes de gestion des chaussées.</p>			
Mots-clés Modèles, performance, chaussées, comportement, analyse, gestion de chaussées, sections tests, base de données	Nombre de pages 42 pages	Nombre de références bibliographiques 26	Langue du document <input checked="" type="checkbox"/> Français <input type="checkbox"/> Anglais Autre (spécifier) :

RÉSUMÉ

Le projet de recherche conjoint entre le ministère des Transports du Québec (MTQ) et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) sur l'établissement des modèles de performance des chaussées s'est amorcé en 2000. Il répond au souhait des deux organismes, parvenus au même stade de développement de leur système d'aide à la gestion des routes, et devant faire face à la même problématique, d'unir leurs moyens et leurs compétences pour progresser plus efficacement. Une convention de coopération, qui a été signée entre les deux organismes, précise les objectifs et le programme de travail, détermine les rencontres nécessaires entre les experts français et québécois concernés et établit le budget du projet.

Si les travaux se sont étalés sur une période un peu plus longue que celle prévue dans le programme – le présent rapport final étant produit en novembre 2004 –, ils ont toutefois permis de couvrir le programme qui avait été planifié. Le second semestre de l'année 2003 et de l'année 2004 ont été consacrés pour l'essentiel à la valorisation des résultats au travers de plusieurs articles, communications et d'un séminaire regroupant de nombreux experts dans le domaine.

Le projet a d'abord permis d'inventorier les principales méthodes statistiques permettant d'exploiter les bases de données issues de programmes de suivi de sections tests en vue de modéliser l'évolution des chaussées. Trois méthodes ont ainsi été considérées dans la suite de l'étude, soit une méthode de régression non linéaire dite « indirecte », une méthode de régression non linéaire « directe » et une méthode fondée sur la théorie des lois de survie. Concrètement, l'application de ces méthodes sur la base de sections tests du MTQ, et plus précisément sur la base des sections de chaussée flexible entretenues et non entretenues, a d'abord permis de les améliorer et de mieux formaliser leurs conditions d'application, notamment à ce type de bases, caractérisées par une population faible mais où chaque individu est très bien caractérisé.

- D'une part, l'expertise métier est apparue comme un fondement essentiel de la préparation de la base, dans son analyse préliminaire et dans le choix des variables explicatives potentielles, choix encadrant l'application des méthodes statistiques.
- D'autre part, les outils mis au point conformément à la méthode statistique indirecte, notamment, ont été remplacés par des techniques plus lourdes mais plus fiables : technique itérative pour ajuster le modèle sur chaque section, technique de régression multiple linéaire systématiquement employée pour identifier les variables explicatives.

- L'application de la méthode de régression non linéaire à une base de sections tests a été formalisée.
- Enfin, l'application de la méthode des lois de survie au cas particulier des chaussées a été modifiée pour éliminer les incohérences qui subsistaient dans ses résultats à la suite des travaux préliminaires réalisés dans le cadre de la première thèse sur le sujet.

Les trois méthodes ainsi renforcées ont été employées pour modéliser l'évolution de la fissuration thermique (transversale) et de la fissuration de fatigue (dans les bandes de roulement), tant sur les chaussées non entretenues que sur les chaussées entretenues. Les modèles obtenus présentent de bonnes qualités prédictives, mais conduisent à des conclusions, en matière d'identification de variables explicatives, qui restent peu sûres. Il est clairement apparu que cette limite trouvait son origine dans le faible nombre de sections – entre 10 et 50 – qui, dans chaque cas, pouvaient être exploitées. C'est indiscutablement l'autre enseignement du projet : les meilleures méthodes statistiques ou probabilistes sont peu efficaces pour identifier, de façon stable et robuste, les variables explicatives les plus significatives, lorsqu'elles sont appliquées à des populations trop clairsemées. L'étude a alors montré que le concept de « robustesse » introduit à l'occasion de l'élaboration de la méthode des lois de survie, mais qui peut être appliqué dans les autres méthodes, permettait de surmonter en bonne partie cette limite.

Finalement, la comparaison des modèles établis pour prédire l'évolution de la fissuration sur les sections flexibles non entretenues d'une part, et entretenues par un resurfaçage d'autre part, ont permis de caractériser l'effet de ce traitement sur ce type de chaussées. On a alors pu, par un exemple, montrer comment cette information pouvait être exploitée dans le cadre d'analyses technico-économiques pour comparer des stratégies d'entretien.

Ces travaux sont décrits dans une douzaine de rapports techniques produits au cours du projet. Ils ont en outre permis de rédiger une série de publications. On trouvera la liste des rapports et des publications dans l'annexe I du présent document.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	9
2. Contexte	11
3. Programmes de travail prévisionnel et réalisé.....	13
4. Synthèse des travaux.....	15
4.1 La base de données du MTQ	15
4.2 Choix et préanalyse de la base de données des sections non entretenues.....	15
4.2.1 Constitution de la base.....	15
4.2.2 Analyse de qualité des données	15
4.2.3 Pré-exploitation des données.....	16
4.3 Choix et pré analyse de la base de données des sections entretenues	16
4.3.1 Constitution de la base.....	16
4.3.2 Analyse de qualité des données	17
4.4 Les méthodologies de modélisation	17
4.5 Application des méthodes de modélisation aux sections non entretenues.....	18
4.5.1 Méthode des lois de survie.....	18
4.5.2 Méthode de régression non linéaire indirecte	19
4.5.3 Application de la méthode de régression non linéaire directe.....	21
4.5.4 Comparaison des méthodes	22
4.6 Application des méthodes de modélisation aux sections entretenues...	24
4.6.1 Méthode des lois de survie.....	24
4.6.2 Méthode de régression non linéaire indirecte	25
4.6.3 Application de la méthode de régression non linéaire directe.....	25
4.7 Synthèse de la modélisation par les trois méthodes.....	26
4.8 Application à une étude technico-économique	26
5. Exploitation des résultats	29
5.1 L'exploitation des résultats du côté du MTQ.....	29
5.1.1 Applications au niveau du réseau	29
5.1.2 Applications au niveau du projet	30
5.1.3 Actions à venir.....	30
5.2 L'exploitation des résultats du côté du LCPC	31
5.2.1 Exploitation au niveau du réseau	31
5.2.2 Exploitation vis-à-vis du suivi de sections tests.....	32
6. Conclusion.....	35
ANNEXE I.....	37
ANNEXE II.....	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Programme de travail prévisionnel.....	p.13
Tableau 2	Programme de travail effectif.....	p.14

1. INTRODUCTION

Le projet de coopération France-Québec sur l'établissement des modèles de performance des chaussées flexibles met en présence le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et le ministère des Transports du Québec (MTQ). Il s'est amorcé au cours de l'année 2000. Sa durée prévue était de trois ans. Il était encadré par deux documents :

- une description du projet [1]¹;
- une convention de collaboration de recherche [2].

Après un rappel du contexte, et des travaux qui étaient prévus au programme de la convention, le présent rapport fait la synthèse des différentes actions réalisées au cours du projet, soit :

- la formalisation des méthodes statistiques;
- la préparation et la préanalyse de la base de sections témoins des chaussées flexibles non entretenues;
- l'application des méthodes à cette base, la comparaison des résultats et l'amélioration des méthodes;
- la préparation et la préanalyse de la base de sections témoins des chaussées flexibles entretenues par un resurfaçage;
- l'application des méthodes à cette seconde base;
- la comparaison des modèles de comportement ainsi obtenus et la caractérisation de l'effet du resurfaçage;
- l'exploitation de ces modèles dans une étude technico-économique illustrant la comparaison, du point de vue de la conservation du patrimoine, de plusieurs stratégies d'entretien;
- l'exploitation des résultats par chacun des deux partenaires.

Il dresse un bilan exhaustif des rapports et des publications qui ont été produits à l'intérieur de ce projet. Il conclut sur les perspectives de valorisation du projet en France et au Québec.

¹ Les numéros entre crochets renvoient aux rapports listés dans l'annexe I.

2. CONTEXTE

Le ministère des Transports du Québec a mis en place un système de gestion des chaussées qui s'appuie sur un véhicule multifonction d'auscultation des chaussées, dont les mesures sont conservées dans le système ministériel GCH-6011. Cette refonte du système de gestion est l'occasion de conduire une réflexion à plus long terme sur les données à recueillir sur un réseau routier pour en assurer une gestion rationnelle. Il s'agit de définir les paramètres qui caractérisent l'état des chaussées et gouvernent leur évolution, et dont la connaissance est indispensable pour conduire des analyses de type coût-avantage. De son côté, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées travaille au développement d'une nouvelle génération de systèmes d'aide à la gestion de l'entretien des routes qui, lui aussi, permettra de conduire des analyses de type coût-avantage.

En 1999, le MTQ et le LCPC faisaient le constat qu'ils étaient arrivés sensiblement au même stade dans la démarche générale d'élaboration et de mise en place de ces nouveaux outils, et qu'ils se trouvaient ainsi placés devant une problématique tout à fait similaire. Il s'agissait essentiellement de mettre au point et de valider des méthodes d'identification des modèles d'évolution des dégradations de chaussées (régression linéaire et non linéaire, méthode des lois de survie, etc.) et de préciser les poids des variables explicatives. Il s'agissait également de voir comment les travaux d'entretien influencent les modèles.

En mettant en commun les éléments dont ils disposaient, notamment les données de suivi de sections pour le MTQ et l'expérience acquise par le LCPC pour l'élaboration des modèles, ainsi que leur expérience du comportement des chaussées et de la gestion des routes, les deux organismes comptaient progresser plus efficacement dans la résolution du problème évoqué dans le paragraphe précédent.

3. PROGRAMMES DE TRAVAIL PRÉVISIONNEL ET RÉALISÉ

Au terme de la convention signée entre les deux organismes, et qui avait reçu l'appui de la Commission Permanente France – Québec, le programme de travaux et le planning s'établissaient pour l'essentiel comme indiqué dans le tableau 1.

Dans les faits, des difficultés sont survenues, des questions ont été soulevées pendant les travaux, tous aléas inhérents au processus de recherche. Elles ont permis de faire avancer les connaissances, mais ont été à l'origine du dépassement dans les délais d'exécution de ce programme. De plus, un effort particulier a été fait pour valoriser les résultats du projet dans le prolongement de celui-ci. En incluant cette phase, le programme s'est en fait déroulé sur quatre ans, conformément au tableau 2.

Tableau 1 : Programme de travail prévisionnel

Définition de la méthodologie et sélection des données	Inventorier et, le cas échéant, classer les données disponibles pour l'établissement des modèles. Cette phase a pour objet d'identifier les modèles qui présentent un intérêt prioritaire pour les deux organismes, et pour lesquels les données disponibles sont les plus complètes et les plus fiables. La suite du programme se fondera de préférence sur ces données. Cette tâche comprend aussi la préparation d'une description précise des informations contenues dans la base de données routières du MTQ.	2000
	Définir, à partir de l'expérience du MTQ et du LCPC, une méthodologie de travail combinant analyses mécaniques et méthodes statistiques, le choix de ces dernières s'appuyant sur les outils accessibles aux partenaires. Cette tâche comprend la formalisation de la méthodologie élaborée au LCPC pour bâtir les lois d'évolution de dégradations.	2000
	Présentation mutuelle des logiciels d'analyse utilisés par les deux organismes : Modeler, Visual PMS, LCCA pour le MTQ; SAS, Programme-Plus pour le LCPC.	2000
Établissement des modèles de performance	On appliquera les méthodes définies dans les tâches précédentes aux données représentatives de différents types de techniques routières dans divers environnements, en commençant par les chaussées flexibles n'ayant pas fait l'objet d'opérations d'entretien « pleine largeur ». Les dégradations auxquelles on s'intéressera en priorité sont celles qui caractérisent l'état de fissuration (faïençage dans les bandes de roulement, fissures longitudinales dans et en dehors des bandes de roulement) et de déformation (orniérage, profil en long).	2001
	Lorsque les méthodes seront bien rodées, on les appliquera aux chaussées flexibles entretenues (resurfacées), dont l'état précédant l'entretien est connu.	2001
Élaboration des méthodes d'analyse de performance	Vérifier l'application des modèles de performance établis au cours de la phase précédente à la méthode d'analyse du coût sur le cycle de vie (LCCA) utilisée par le MTQ. Il s'agira ensuite de valider la méthode d'analyse à l'aide de cas types.	2002
Rapport final	La convention se conclura par l'édition d'un rapport final dont le contenu sera précisé au cours des travaux. La répartition de la charge de rédaction sera faite de façon équilibrée lorsque le contenu sera défini.	2002

Tableau 2 : Programme de travail effectif

Définition de la méthodologie et sélection des données	Formalisation des méthodes élaborées au LCPC pour bâtir les lois d'évolution de dégradations.	2000
	Inventaire et description précise des données disponibles dans la base de données routières du MTQ. Il est décidé de s'intéresser plus spécialement aux fissurations transversales thermiques et de fatigue sur les chaussées flexibles, en raison de la fiabilité des données concernant ces dégradations. Constitution et préanalyse de la base de données de sections non entretenues (23 sections).	2000
	Présentation mutuelle des logiciels d'analyse utilisés par les deux organismes : Modeler, Visual PMS, LCCA pour le MTQ; SAS, Programme-Plus pour le LCPC.	2000
Établissement des modèles de performance	Premières applications de la méthode des lois de survie et de la méthode de régression non linéaire indirecte sur les sections non entretenues. La méthode des classes, qui ne paraît pas adaptée au traitement des données disponibles en raison du faible nombre de sections, n'est pas mise en œuvre. → L'importance de guider les analyses statistiques par l'expertise métier est mise en évidence. → Des améliorations sont proposées pour la méthode des lois de survie et la méthode de régression indirecte. → Une nouvelle méthode de régression directe non linéaire est proposée par le MTQ.	2001
	Constitution et préanalyse de la base de données de sections non entretenues (42 sections).	2001
	Nouvelle application des trois méthodes à la base de sections non entretenues. Application des ces méthodes à la base de sections entretenues. → Conclusion sur l'identification des variables explicatives, sur les qualités prédictives des modèles de chaque méthode.	2002
Élaboration des méthodes d'analyse de performance	Illustration de l'application des modèles de performance établis au cours de la phase précédente à l'analyse de coûts sur le cycle de vie.	2003
Valorisation	Rédaction d'articles et de communications.	2003-4
Rapport final	Edition d'un rapport final.	2004

4. SYNTHÈSE DES TRAVAUX

Les paragraphes ci-dessous donnent un reflet des travaux réalisés, des difficultés survenues, des solutions adoptées pour les surmonter. Ils s'efforcent de faire un premier bilan des enseignements du projet.

4.1 La base de données du MTQ

La base de données du MTQ est issue d'un programme de suivi de sections d'essais, dérivé des programmes américain (SHRP) et canadien (C-SHRP). Elle porte sur plus de 400 sections d'essais regroupées sur 115 sites. Le second rapport technique du projet [4], rédigé également en 2000, décrit ce programme de suivi ainsi que les données qui y sont recueillies. Celles-ci comprennent les variables d'état (uni, ornière, fissuration et adhérence) et les variables explicatives sur le comportement des chaussées (épaisseur, climat, trafic, déflexion, propriétés des matériaux, etc.).

4.2 Choix et préanalyse de la base de données des sections non entretenues

4.2.1 Constitution de la base

S'agissant de travailler à la modélisation des dégradations apparaissant sur les chaussées flexibles non entretenues, le MTQ a, dans un premier temps, extrait les 25 sections de sa base de données répondant à ces particularités. Les données ont été enregistrées dans des fichiers Excel de manière à être facilement récupérables par le LCPC. Ce fichier a été complété au long du projet au fur et à mesure que de nouveaux relevés étaient réalisés (en 2001 et 2002). Partant de ces éléments, le LCPC a constitué et actualisé un fichier pour chacune des variables dont on veut expliquer le comportement (IRI [*International Roughness Index*], fissuration, ornière et déflexion) en y joignant toutes les variables susceptibles de contribuer à cette explication (trafic, conditions climatiques, stratigraphie de la chaussée, sol d'infrastructure, déflexion, etc.).

4.2.2 Analyse de qualité des données

Avant d'entreprendre une application systématique des différentes méthodes d'analyse à la base, une série de contrôles a été réalisée pour évaluer la pertinence et la fiabilité des informations que celle-ci contient, à savoir :

- **la représentativité des sections** : pour que l'analyse du poids des principales variables explicatives ait un sens, il faut que celles-ci couvrent des plages de valeurs suffisamment larges dans la base. Ce sont ces plages qui ont été examinées pour les âges d'observation des sections, les sollicitations (trafic, climat), l'état initial (profil, déflexion);

- **la qualité des données** : on s'est notamment intéressé à la justesse et à la répétabilité des mesures (orniérage, IRI) et des relevés (fissuration de fatigue et de retrait thermique) même si, dans ce dernier cas, il n'a pas été possible de quantifier la justesse, par contre la procédure employée «de type manuelle » est jugée la plus fiable pour ce relevé;
- **l'homogénéité des sections** : en traçant, sur différents diagrammes, les mesures de déflexion et les mesures d'ornières, on peut évaluer l'homogénéité longitudinale de ces sections au moins de ces points de vue. En revanche, pour les fissurations comme pour l'IRI, on ne disposait que d'une valeur moyenne par section, ce qui excluait toute analyse d'homogénéité longitudinale;
- **la cohérence de la base** : on a tracé les courbes de variation temporelle des différents paramètres d'état des sections. Cela permet de détecter les éventuels points singuliers sur ces courbes (diminution anormale d'une détérioration, par exemple). En remontant à la section et au relevé d'où provient un point singulier, on a pu expliquer l'origine de cette « anomalie » et statuer sur l'utilisation de cette donnée dans la suite du processus d'analyse.

Chaque fois qu'on a pu l'évaluer, la qualité des informations contenues dans la base s'est avérée excellente, tant en répétabilité qu'en reproductibilité, justesse et cohérence. De plus, la distribution des valeurs que prennent les variables est apparue suffisamment large pour donner du sens aux analyses. Les résultats de cette préanalyse ont été consignés dans un rapport technique [6].

4.2.3 Pré-exploitation des données

Des méthodes telles que les ACP ont été appliquées aux données pour sélectionner les variables explicatives potentielles [7]. Ainsi, lorsqu'on a disposé de plusieurs mesures FWD faites à différentes dates, sur une voie d'une section test, on a caractérisé le comportement mécanique de la voie ou des deux voies de cette section par la première valeur des paramètres FWD, mesurée en période estivale. Ce sont ces valeurs qui ont été prises comme variables explicatives potentielles pour la fissuration de fatigue et l'orniérage.

4.3 Choix et pré analyse de la base de données des sections entretenues

4.3.1 Constitution de la base

Au cours de l'année 2001, le MTQ a extrait les 69 sections de sa base de données, correspondant aux sections ayant reçu un entretien par une couche de resurfaçage en enrobé bitumineux. Dans ce nombre, on compte 42 sections pour lesquelles on possède toutes les variables explicatives. En ce qui

concerne les 27 autres sections, certaines informations sont manquantes, principalement les épaisseurs des couches de la chaussée et le type de sol support. Ces données ont été enregistrées dans des fichiers Excel du même type que ceux correspondant aux chaussées sans entretien.

4.3.2 Analyse de qualité des données

L'analyse qui avait été faite pour les données des sections non entretenues a été également appliquée pour vérifier la qualité des données provenant des sections entretenues. Cela a donc comporté :

- **la représentativité des sections**, y compris l'état avant resurfaçage. Les plages de variation des variables potentiellement explicatives sont apparues suffisantes pour que l'analyse de leur influence soit significative;
- **la qualité des données**, notamment leur justesse et leur répétabilité, fondées là encore soit sur l'examen des moyens de recueil (fissurations), soit sur les résultats de tests comparatifs (uni longitudinal, orniérage, déflexion));
- **l'homogénéité longitudinale des sections** évaluée en portant sur graphique les valeurs des variables d'état (orniérage, déflexion) le long du relevé sur 150 mètres. Là encore, on ne peut mesurer l'homogénéité longitudinale des relevés de fissuration et d'IRI car on ne dispose que d'une valeur moyenne par section;
- **la cohérence de la base, évaluée en traçant** les courbes de variation temporelle des différents paramètres d'état des sections.

La base de données des sections entretenues et les analyses préliminaires qui y ont été appliquées sont présentées en détail dans le rapport [10].

4.4 Les méthodologies de modélisation

L'identification des modèles de performance des chaussées nécessite l'élaboration d'une méthode d'interprétation statistique des données contenues dans les bases issues des observations de sections tests. Le LCPC avait élaboré, outre deux méthodes statistiques conventionnelles, une méthode basée sur la théorie des lois de survie.

- La première méthode statistique (de régression indirecte) consistait à ajuster une courbe de forme générale connue (sigmoïde) sur le nuage de points obtenu en reportant les observations d'un paramètre d'état de la chaussée en fonction du temps.

- La seconde méthode statistique (des classes) consistait à modéliser le pourcentage de sections sur lesquelles un paramètre d'état donné franchit différents seuils.
- La troisième méthode (des lois de survie), plus originale et certainement plus puissante mais plus lourde à mettre en œuvre, consistait à étudier la probabilité de survie d'une section dans un état donné.

En 2000, ces méthodes ont été formalisées, dans leur forme initiale, dans le premier rapport technique du projet [3].

4.5 Application des méthodes de modélisation aux sections non entretenues

Très rapidement, il est apparu au LCPC que le nombre limité de sections à traiter ne permettait pas une application de la méthode des classes, basée sur un processus de type markovien. De ce fait, seules la méthode des lois de survie et la méthode de régression indirecte ont été réellement appliquées aux données par le LCPC. En parallèle, le MTQ a exploré une autre procédure, basée sur une régression non linéaire qui incorpore directement dans le modèle les différentes variables explicatives. Les paragraphes qui suivent font le bilan de ces applications.

4.5.1 Méthode des lois de survie

Lorsqu'on a entrepris d'appliquer la méthode des lois de survie, comme décrite dans [3], il est rapidement apparu qu'il fallait lui apporter certaines adaptations et certains compléments :

- d'une part, pour éviter des incohérences dans les modèles, incohérences caractérisées par des croisements de courbes de répartition entraînant l'apparition de points de rebroussement dans les lois d'évolution. Dans un premier temps, des aménagements de la méthode ont été proposés qui, sans résoudre totalement le problème, l'atténuaient nettement [7]. Les recherches se sont poursuivies et ont finalement débouché sur une procédure qui permet de résoudre totalement les incohérences observées ci-dessus, au prix, il est vrai, d'une hypothèse sur la forme du modèle à identifier;
- d'autre part, pour essayer de traiter les phénomènes de saisonnalité. Là, aucune solution à court terme n'est apparue. L'objectif principal de l'étude étant la modélisation de l'évolution annuelle des indicateurs, cet aspect n'a pas été vraiment approfondi; on s'est donc borné à ne considérer que les données posthivernales (fissuration thermique) ou postprintanières (fissuration de fatigue et orniérage), ce qui gomme les évolutions saisonnières en respectant les tendances annuelles.

On a alors procédé successivement à la modélisation de la fissuration transversale, de la fissuration de fatigue, de l'orniérage et de l'uni longitudinal sur les chaussées non entretenues. Pour cela, on a listé à partir d'une première analyse métier, pour chacune des variables à modéliser, toutes les variables explicatives potentielles [6]. On a ensuite proposé ces variables à l'analyse par la méthode des lois de survie. Il s'est alors avéré que, certainement en raison du nombre restreint de sections et du nombre comparativement élevé de variables explicatives potentielles testées ensemble, la méthode ne réussissait pas à établir que certaines de ces variables étaient explicatives et encore moins lesquelles. On parvenait à la conclusion apparente qu'aucune variable n'était significative. En fait, ces premiers travaux de modélisation ont surtout permis de conclure sur l'importance de conduire une réflexion métier préliminaire approfondie – éventuellement en s'aidant de méthodes très simples de statistique – pour orienter la modélisation par les lois de survie. Mieux cette étude métier encadrerait les variables explicatives, plus la modélisation par les lois de survie était efficace.

L'analyse a alors été renouvelée selon une procédure tenant compte de ces enseignements, sur la base de chaussées non entretenues d'abord, puis sur celle des chaussées entretenues, en focalisant sur la modélisation de la fissuration de fatigue. Dans une première étape, on a analysé l'influence des variables explicatives potentielles une à une. Puis, en retenant les variables qui présentaient l'influence la plus grande à l'étape précédente, on a renouvelé l'exercice en recherchant les combinaisons les plus influentes de ces variables, prises deux par deux d'abord, trois par trois ensuite. Ainsi conduite, l'analyse statistique par les lois de survie a débouché sur des résultats plus encourageants, notamment en ce qui concerne l'identification des variables explicatives [12]. Il reste que la recherche des combinaisons les plus influentes peut déboucher sur des résultats différents selon le seuil de dégradation qu'on considère : telle combinaison ressortira comme la plus explicative de l'apparition de la fissuration de fatigue (franchissement du seuil 0 %) alors que telle autre paraîtra plus explicative pour le franchissement du seuil 10 %. Ce constat, qui provient de ce que le test de significativité des variables explicatives est réalisé seuil par seuil, peut recouvrir une réalité physique, ou au contraire, résulter d'un artefact de calcul. L'interprétation de ces résultats a été réalisée dans le cadre d'une thèse [25].

4.5.2 Méthode de régression non linéaire indirecte

La méthode de régression, décrite dans le document [3], a été appliquée à la base de sections non entretenues pour déterminer la courbe d'évolution moyenne de chacune des variables étudiées (fissuration transversale, fissuration de fatigue, orniérage, uni longitudinal). Pour mémoire, cette méthode enchaîne deux étapes.

- On cale, sur les observations de chaque section, une courbe d'équation prédéfinie, de type sigmoïde ou exponentielle; on utilise pour cela une transformation logarithmique puis une régression linéaire; à l'issue de cette étape, on dispose, pour chaque section, de la valeur des deux coefficients, u (coef. de mi-vie) et p (coef. de forme), qui paramètrent la courbe sigmoïde ou exponentielle.
- On cherche à expliquer les couples de valeurs $\{u, p\}$ par les caractéristiques des sections (chaussées, trafic et climat); dans ce but, on considère l'ensemble des sections et on réalise une régression linéaire pas à pas ascendante en passant, là encore, par une transformation logarithmique.

Ce travail a été rapporté dans [9a], qui précise notamment quelles sont les variables explicatives qui agissent sur les différentes dégradations modélisées. En 2002, la comparaison des résultats produits par les différentes méthodes (voir ci-dessous) a conduit à s'interroger, puis à améliorer significativement la méthode de traitement.

- D'une part, il s'est avéré que la régression linéaire appliquée pour identifier les coefficients u et p de la courbe sigmoïde sur les différentes sections donnait un poids beaucoup trop important aux observations présentant de très faibles niveaux de dégradation, souvent les plus bruitées et donc les moins fiables. Cette méthode a été remplacée par une méthode itérative qui, bien que peu élaborée, permet d'obtenir un calage beaucoup plus précis sur les observations de terrain, et donc des estimations de u et p beaucoup plus fiables.
- D'autre part, pour trouver les variables explicatives de ces deux coefficients, on a d'abord tenté de remplacer la régression pas à pas par une régression PLS (*Partial Least Squares*) qui a été présentée dans le rapport [9b]. Le résultat n'était pas convaincant, et finalement, c'est l'application systématique d'une méthode de régression multiple linéaire qui a permis d'obtenir les meilleurs résultats. Considérant qu'on recherche les trois variables qui expliquent le mieux les coefficients, u ou p , on réalise toutes les combinaisons possibles de variables potentielles trois à trois, et on retient celle qui présente la meilleure corrélation avec les valeurs des coefficients à modéliser. Cette méthode est, certes, lourde mais les moyens de calcul actuels permettent de l'appliquer sans difficulté.

Dans cette méthode, dont les résultats ont été présentés dans un article [18], le nombre de sections exploitables pour la modélisation de l'évolution de la fissuration sur les chaussées flexibles avant travaux (23) est encore réduit du fait que, pour appliquer la première étape à une section, il faut disposer d'au moins deux observations non nulles sur celle-ci. Cette condition n'est remplie que sur une petite dizaine de sections (9, en fait), dont deux ont un

comportement jugé atypique (dégradation rapide et forte avec un trafic relativement faible, explicable par une surchauffe du bitume à la mise en œuvre, non caractérisé dans la base de données) et quatre sont identiques entre elles, au grade du bitume près. Dans ces conditions, et même en faisant une place importante à l'expertise métier, les conclusions sont assez peu robustes, en ce qu'elles varient assez fortement si on supprime telle ou telle section, voire telle ou telle observation.

On notera qu'on a pu, dans cette méthode également, introduire le concept de robustesse de la section à travers un coefficient qui peut être calculé sur toutes les sections de la famille présentant au moins une observation non nulle (soit une vingtaine), ce qui améliore significativement la validité du modèle.

4.5.3 Application de la méthode de régression non linéaire directe

La méthode de régression mise en application par le MTQ est appelée ici « directe » puisqu'elle intègre directement les variables explicatives dans le modèle. Cette méthode considère que la valeur prise par un indicateur d'état à un instant donné est fonction de l'âge de la section et de la valeur des variables explicatives sur cette section. Une méthode de régression non linéaire intégrant directement les variables explicatives dans le modèle est utilisée. En plus de l'âge, des variables comme le trafic ou le type de bitume sont présentes dans le modèle, augmentant ainsi le nombre de paramètres à estimer. Les paramètres du modèle sont estimés en considérant l'ensemble des sections simultanément. Autant pour la fissuration de fatigue que pour la fissuration thermique, une courbe sigmoïde a été sélectionnée après examen des données disponibles. La loi d'évolution type s'écrit comme suit :

$$F(t) = F_{\max} * \exp\left(\frac{-\alpha_0 V_1^{\alpha_1} V_2^{\alpha_2} V_3^{\alpha_3} \dots V_k^{\alpha_k}}{t^p}\right)$$

où V_1 à V_k sont un sous-ensemble des n variables anticipées par l'expertise métier pour expliquer l'évolution du paramètre F et les paramètres p , α_0 , α_1 , α_2 , α_3 , sont les paramètres à estimer.

La méthode nécessite donc la réalisation d'une première analyse métier afin de sélectionner les n variables explicatives potentielles.

Ensuite, les paramètres α_0 , α_1 , α_2 , α_3 et p sont estimés pour toutes les ${}_nC_3$ combinaisons V_1 , V_2 , V_3 choisies à partir des n variables identifiées par l'analyse métier. Ayant obtenu les estimations pour les paramètres des ${}_nC_3$ modèles à l'étape précédente, il s'agit ensuite de déterminer, parmi ces combinaisons de variables explicatives, laquelle permet d'obtenir la loi d'évolution décrivant le mieux les données observées. Pour ce faire, une méthode d'ordonnement des modèles a été mise au point en utilisant l'écart quadratique moyen comme statistique synthèse de l'adéquation de chacun des modèles. Une fois tous les modèles ordonnés, le modèle retenu

peut être celui présentant le rang minimum, ou encore celui ayant le meilleur rang en considérant des variables explicatives imposées par l'expertise en comportement des chaussées.

Notons que le modèle retenu reste un modèle moyen duquel peuvent diverger les observations. Toutefois ce modèle peut être ajusté pour tenir compte de ces divergences. La méthode retenue consiste à calculer, pour chaque relevé, l'âge auquel la valeur observée est atteinte selon le modèle. Le rapport entre cet âge attendu et l'âge réel d'observation est calculé pour chaque relevé disponible et la moyenne de ces rapports est utilisée pour tracer un modèle mieux adapté aux observations sur la section. Ce modèle est appelé « avec robustesse » puisqu'il intègre des paramètres propres à la section et qui ne sont pas pris en compte par les variables explicatives retenues.

Dans l'application de cette méthode, un certain nombre de difficultés se sont posées en raison du faible nombre de sections considérées. Parmi celles-ci, notons les corrélations « fictives » : il s'agit de variables qui, sur le strict plan physique n'ont aucun lien entre elles mais qui, exprimées à travers le jeu de données disponibles, présentent, par hasard, une corrélation significative. Notons aussi les difficultés liées à la mise en œuvre des méthodes itératives d'estimation des paramètres : si les valeurs initiales des paramètres ne sont pas bien spécifiées, la procédure peut ne pas converger vers les estimateurs. Toutefois, la méthode permet de prendre en compte l'ensemble des observations obtenues sur la totalité des sections disponibles dans la base. Les résultats détaillés ont été présentés dans un rapport [9c].

4.5.4 Comparaison des méthodes

La comparaison des méthodes a été entreprise sur la base des critères suivants :

- Concordance des variables explicatives retenues;
- Capacité d'adéquation aux valeurs observées ayant servi à la modélisation;
- Capacité prédictive, c'est-à-dire sur de nouvelles observations n'ayant pas contribué à la modélisation;
- Robustesse des modèles à l'absence d'information sur les variables explicatives retenues.

Ces travaux ont permis de tirer les conclusions suivantes [19] :

- D'une façon générale, l'introduction des **connaissances métier** dans la démarche, tant en ce qui a trait à la sélection des variables potentiellement explicatives qui seront testées par voie statistique qu'en

ce qui concerne les résultats de ces tests, est un facteur de réussite important dans la modélisation.

- L'application des méthodes de régression directe autant qu'indirecte implique une **définition préalable** de la forme des courbes d'évolution. En principe, ce n'est pas nécessaire pour appliquer la méthode des lois de survie. En pratique, et pour éviter certains artefacts que peut générer cette méthode dans le traitement de bases à population restreinte, certaines évolutions lui ont été apportées qui obligent à prédéfinir la forme de la courbe d'évolution, ce qui annule l'avantage mentionné ci-dessus.
- La méthode de **régression directe** prend en compte toutes les observations disponibles, mais fait l'hypothèse qu'elles sont toutes indépendantes, ce qui n'est notamment pas exact lorsque plusieurs observations ont été faites successivement sur une même section. Elle permet une modélisation un peu meilleure que la méthode de régression indirecte, surtout si on n'introduit pas la correction par le concept de robustesse, c'est-à-dire si on cherche à prédire le comportement de sections sur lesquelles on ne dispose encore d'aucune observation.
- A l'inverse, la méthode de **régression indirecte** ne prend en compte que les sections sur lesquelles on dispose d'au moins deux observations non nulles, ce qui restreint le jeu de données, mais elle intègre les relations de dépendance entre les observations faites sur une même section.
- La méthode **des lois de survie** prend en compte toutes les observations, y compris les observations uniques sur une section, et les observations nulles (dégradations pas encore apparues). Comme la méthode de régression directe, elle considère toutes les observations comme indépendantes.
- Plusieurs des **variables explicatives clés** ont été identifiées par au moins deux méthodes.
- Aucune des méthodes ne surclasse clairement les deux autres en ce qui concerne la **qualité de prédiction** telle qu'elle a pu être testée, c'est-à-dire sur trois ans.
- Enfin, l'introduction de la notion de **robustesse** améliore très sensiblement cette qualité prédictive sur toutes les sections pour lesquelles on dispose d'au moins une observation.

En marge de ces enseignements précis, l'une des conclusions majeures de ce projet est aussi qu'il faut poursuivre les programmes de suivi de sections tests

tout en exploitant les bases de données de gestion des réseaux routiers. Cette persévérance dans l'effort est une condition pour mettre à la disposition des gestionnaires des outils d'aide à la gestion prédictifs, indispensables pour optimiser sur une base rationnelle les politiques d'entretien. On retient aussi tout l'intérêt de tels outils pour réduire la fréquence des campagnes d'auscultation des réseaux routiers.

4.6 Application des méthodes de modélisation aux sections entretenues

Le travail sur les chaussées entretenues s'est concentré sur la modélisation de la fissuration de fatigue. Cette information est présente dans la base pour 23 des 69 sections mentionnées au paragraphe 4.3. Comme sur les chaussées non entretenues, la modélisation a été élaborée à l'aide de trois méthodes :

- méthode de régression non linéaire dite « indirecte »,
- méthode de régression non linéaire dite « directe »,
- méthode probabiliste des lois de survie.

Les travaux réalisés pour chacune des méthodes sont brièvement présentés dans les sections suivantes. Chacune d'elle a été appliquée après que les variables potentiellement explicatives ont été identifiées.

Plusieurs possibilités d'analyse se sont présentées, du fait que certaines variables explicatives n'étaient pas documentées sur certaines sections, et d'autres variables n'étaient pas documentées sur d'autres sections. Chaque méthode a donc dû être adaptée pour tenir compte de cette réalité.

4.6.1 Méthode des lois de survie

La méthode des lois de survie, telle qu'elle est décrite plus haut, a été appliquée aux sections entretenues [12]. La population analysée est composée en fait de 45 sections sur lesquelles ont été collectées, parfois de façon incomplète, 17 variables explicatives.

Une première série de modélisations a été réalisée en intégrant les variables explicatives une par une, dans le but d'identifier celles qui avaient le pouvoir explicatif le plus marqué. Trois variables sont ressorties à ce stade, selon les niveaux de fissuration atteints sur la chaussée : l'épaisseur totale de bitume (niveaux < 55 mm/m²), le rapport entre les épaisseurs de la couche d'entretien et de la structure initiale (niveaux entre 15 et 55 mm/m²) et la hauteur de précipitation (niveaux entre 35 et 190 mm/m²).

Dans un second temps, on a combiné ces variables deux à deux pour obtenir une modélisation plus précise. La combinaison « épaisseur totale traitée + hauteur de précipitation » s'est avérée la plus pertinente.

4.6.2 Méthode de régression non linéaire indirecte

Parmi les sections de la base du MTQ qui répondaient à la double exigence d'être flexibles et d'avoir été traitées une fois au moins par un resurfaçage, seules 11 présentaient à la fois :

- 2 observations non nulles ou plus sur la période estivale;
- 13 variables jugées *a priori* explicatives, complètement documentées.

Pour l'essentiel, les variables intervenant pour expliquer le développement de la fissuration de fatigue dans les chaussées non entretenues ont été reprises sur les chaussées resurfacées. On y a ajouté les variables caractérisant le resurfaçage lui-même et celles pouvant caractériser l'état de la chaussée avant cette opération, notamment le taux de fissuration avant travaux. En revanche, et du fait qu'il n'existe pas véritablement de méthode de dimensionnement des resurfaçages des chaussées flexibles, il n'a pas été possible de sélectionner des variables reflétant la conception de l'entretien.

Les calculs de modélisation ont été conduits comme sur les sections non entretenues, c'est-à-dire (voir plus haut).

- On cale, sur les observations de chaque section, une courbe d'équation prédéfinie dont on identifie les coefficients de mi-vie et de forme, u et p .
- On cherche à expliquer ces valeurs par les variables explicatives en considérant l'ensemble des sections et en réalisant une régression linéaire pas à pas.

Parmi les variables explicatives que semblent pointer l'analyse faite selon cette méthode, on trouve l'indice de gel, le trafic réel, l'épaisseur totale traitée ou encore l'épaisseur de d'enrobé bitumineux (BB) avant travaux. Toutefois, comme le souligne le rapport, l'interprétation est difficile, en raison principalement du nombre très réduit de sections qui ont pu être considérées.

4.6.3 Application de la méthode de régression non linéaire directe

La méthode utilisée pour la modélisation des chaussées non entretenues a été adaptée à la modélisation des chaussées ayant reçu un resurfaçage [13b]. La principale différence avec la première application tient au fait que la base contient plusieurs valeurs manquantes pour des variables importantes dans la caractérisation de l'évolution de la fissuration.

La méthode a donc consisté, dans une première étape, à utiliser les sections pour lesquelles les valeurs prises par les cinq variables explicatives potentielles étaient connues. Ce premier exercice d'identification a donc été effectué sur 22 sections en utilisant le critère de l'écart quadratique moyen comme utilisé pour la première base de données. Cet exercice a conduit à identifier la variable « Taux de fissuration avant le resurfaçage » comme étant celle qui permet d'obtenir la meilleure adéquation.

Ensuite, en utilisant toutes les sections pour lesquelles le taux de fissuration avant resurfaçage est connu, on a testé les combinaisons formées par cette variable et chacune des autres prises séparément. Les estimations des paramètres p , α_0 , α_1 , α_2 sont donc obtenues en utilisant un plus grand nombre de sections que les seules 22 pour lesquelles les valeurs prises par les cinq variables explicatives potentielles sont connues.

Les modèles obtenus sont comparés en utilisant une fois la même méthode. Cette comparaison est restreinte sur les 22 sections de départ afin d'éliminer l'effet du nombre de sections. La combinaison de variables qui a obtenu globalement le meilleur rang était formée des variables :

- taux de fissuration avant resurfaçage;
- trafic (ECAS) réel/trafic (ECAS) de mise en œuvre sur la période de design.

4.7 Synthèse de la modélisation par les trois méthodes

Plus encore que dans le cas du comportement des chaussées non entretenues, on observe ici que les trois méthodes pointent des variables explicatives distinctes. A l'évidence, le faible nombre de sections disponibles et plus encore le fait que, selon leurs conditions d'application, les trois méthodes ne considèrent pas exactement les mêmes données, explique cette conclusion. En outre, une corrélation partielle et circonstancielle entre des variables peut accroître la confusion. Ce résultat incite à approfondir la question, notamment en recherchant, pour les méthodes de régression, des approches pour caractériser la fiabilité d'une identification telle que ce qui existe pour la méthode des lois de survie.

4.8 Application à une étude technico-économique

Les modèles qui ont été finalement établis pour l'évolution de la fissuration de fatigue sur les chaussées flexibles ont été appliqués pour conduire une étude comparative de différentes stratégies d'entretien [20]. Cette étude a permis de déterminer le scénario offrant la meilleure rentabilité à long terme dans le cas d'un projet où l'on vient intervenir sur un segment de route bien dimensionné. Ces analyses ont été faites pour une période de 40 ans à des seuils

d'intervention différents (de 50 à 500 mm/m²), correspondant à des interventions variant de préventives à très tardives.

Cinq types d'intervention ont été considérés pour l'analyse des divers scénarios, soit :

- la construction ou reconstruction d'une chaussée;
- le resurfaçage, le planage + le resurfaçage;
- la pose d'une couche de correction + le resurfaçage;
- le retraitement en place avec stabilisation.

Les coûts d'intervention sont basés sur ceux utilisés par le MTQ dans son système de gestion des chaussées.

Les scénarios d'intervention ont été basés sur une séquence réaliste d'entretien des chaussées, selon le degré de dégradation. Différentes combinaisons des types d'intervention ont été examinées, au total 23 scénarios d'entretien ont été simulés. La stratégie d'intervention offrant le meilleur rendement a été déterminée selon le rapport –coût-avantage optimum.

Les simulations indiquent qu'il est plus avantageux d'intervenir lorsque le taux de fissuration est faible parce qu'il est alors possible d'appliquer des techniques moins coûteuses (resurfaçage). Cependant, il n'est pas rentable d'intervenir à une fréquence trop rapprochée, parce que les interventions sont alors trop nombreuses (augmentation du coût d'entretien). Ainsi, la meilleure stratégie d'intervention consiste à faire un premier resurfaçage sept ans après la construction (seuil d'intervention à 100 mm/m²) et ensuite, à renouveler la couche de surface tous les quatre ans. Par contre, lorsque la chaussée a déjà atteint un niveau de dégradation assez élevé, le retraitement en place devient l'intervention la plus avantageuse. D'autre part, il n'est pas avantageux d'attendre trop longtemps avant d'intervenir. Ainsi, pour une chaussée dégradée, il est plus rentable de faire un retraitement en place onze ans après la construction, soit lorsque la chaussée a atteint un seuil de dégradation de 300 mm/m², puis de faire un resurfaçage sept ans après le retraitement et enfin, de renouveler la couche de surface tous les quatre ans.

Cette même étude a été faite pour les cas où la chaussée aurait été sous et surdimensionnée [14].

5. EXPLOITATION DES RÉSULTATS

Comme mentionné dès le début du projet (voir le point 1), un certain nombre de retombées étaient escomptées au terme de la réalisation du projet. Parmi celles-ci, notons par exemple un meilleur choix des interventions et une augmentation de la durée de vie des interventions sur les routes par une meilleure connaissance de la performance des différentes techniques d'intervention (comportement vs coûts).

Il était prévu d'intégrer les modèles de performance établis par l'entremise de ce projet de coopération dans les systèmes de gestion des chaussées utilisés par le LCPC et le MTQ.

Nous présentons dans les paragraphes qui suivent les actions entreprises et celles à venir, par chacun des deux partenaires, afin d'exploiter au maximum les résultats obtenus jusqu'ici et concrétiser ainsi les retombées que la réalisation de ce projet nous a apportées.

5.1 L'exploitation des résultats du côté du MTQ

Les modèles de performance des chaussées trouvent, au MTQ, plusieurs applications tant au niveau du réseau qu'au niveau du projet.

5.1.1 Applications au niveau du réseau

Les modèles nous ayant permis d'identifier un certain nombre de variables à haut potentiel explicatif, la collecte de l'information sur celles-ci sera systématisée. Par exemple, le MTQ compte sensibiliser les usagers du système de gestion des chaussées à l'importance d'inscrire, dans le système, les données concernant des classes PG pour les bitumes, au moins pour les chaussées nouvellement construites. Des efforts seront fournis aussi pour déterminer les valeurs reliées au trafic de dimensionnement et réel (ECAS), etc. Ainsi, l'identification des variables explicatives et la détermination de leur contribution dans le comportement des chaussées permettant de justifier la réalisation de certains types de relevés au niveau du réseau, il est probable qu'une campagne de relevés par géoradar sera menée afin de déterminer les épaisseurs de matériaux liés en surface.

Pouvoir disposer de modèles mieux adaptés aux caractéristiques locales en fonction des variables explicatives permettra de régler un certain nombre de problèmes de cohérence observés lorsque les chaussées ne sont auscultées qu'une année sur deux. Les modèles actuellement utilisés par le système génèrent, en certains endroits, des valeurs vieilles artificiellement qui démontrent une détérioration significativement plus importante que lorsque la chaussée est auscultée l'année suivante. De telles incohérences, même rares, mettent en danger la crédibilité du système et entachent d'une certaine erreur les simulations pluriannuelles qui sont faites à partir de ces imputations.

Notons finalement que les modèles permettent d'orienter les stratégies d'intervention en fonction du rapport –coût-avantage et en tenant compte des cycles d'intervention sur une longue période (ex. : 40 ans). Ainsi, il a été démontré dans le cas de la fissuration de fatigue qu'il est plus avantageux d'intervenir sur les chaussées lorsque le taux de fissuration est d'environ 100 mm/m² à l'aide d'une nouvelle couche de surface. Dans le cas de chaussées ayant un taux de fissuration plus élevé, il est plus avantageux d'intervenir par décohesionnement du revêtement bitumineux sur les chaussées lorsque le taux de fissuration est d'environ 300 mm/m².

5.1.2 Applications au niveau du projet

Au niveau du projet, les modèles ont été utilisés pour étudier l'optimisation du comportement des chaussées en fonction du rapport coût-avantage. L'étude a porté sur l'optimisation de la classe PG des bitumes pour contrer les phénomènes de fissuration thermique et de fatigue. Les résultats de cette étude ont été utilisés par le MTQ en vue de la mise à jour des tableaux de recommandations pour le choix des enrobés publiés en 2005 (site Internet).

Une première retombée en ce qui concerne l'orientation des contrôles en chantier en fonction des paramètres prépondérants (variables explicatives) sur le comportement des chaussées a déjà été observée. En effet, les problèmes reliés à la surchauffe des bitumes en période automnale et/ou avec un temps de transport considérable ont été identifiés en comparant certaines valeurs observées sur des sections aux valeurs attendues selon les prédictions faites par les modèles. Des articles ont été introduits dans le Cahier des clauses et devis généraux (CCDG) pour résoudre cette problématique.

Les modèles de performance établis sont en lien direct avec l'orientation de la nouvelle méthode de dimensionnement des chaussées mise au point aux États-Unis (*Pavement Design Guide*). L'expérience acquise dans le cadre du projet sera un atout majeur pour la calibration régionale des modèles de performance du MTQ.

5.1.3 Actions à venir

Le MTQ prévoit de mettre à jour les modèles établis en utilisant des données additionnelles provenant de sa base de données « suivi de performance » et de sa base de données « réseau ». En effet, les modèles seront repris en utilisant l'information supplémentaire obtenue depuis la réalisation du projet, soit les observations faites sur les sections entre 2002 et 2004. D'autres sections (décohesionnement, isolation, etc.) seront aussi examinées pour déterminer si elles peuvent venir enrichir l'une ou l'autre base.

La base de données « réseau » sera aussi mise à contribution : des sections seront sélectionnées pour compléter les observations manquantes dans les

bases de données utilisées dans le cadre du projet. Ces sections serviront de jalon pour formaliser ce que le MTQ appelle des suivis de niveau 2. Il s'agit de suivis de sections du réseau effectués avec plus de détails que le suivi périodique régulier (suivi de niveau 3, soit le suivi de niveau du réseau) sans toutefois être aussi détaillé que les suivis de performance.

Finalement, les différentes méthodes de modélisation seront comparées afin de déterminer leur champ d'application optimal en fonction du niveau de suivi :

- suivi de performance (niveau 1);
- suivi de projets (niveau 2);
- suivi du réseau (niveau 3);

5.2 L'exploitation des résultats du côté du LCPC

C'est dans le cadre du développement de systèmes d'aide à la gestion de type prédictif que le LCPC a été amené à s'intéresser aux méthodes de modélisation de l'évolution des indicateurs d'état des chaussées. C'est donc tout naturellement dans ces applications au niveau du réseau qu'on attend les principales retombées du projet. En même temps, il faut tenir compte des difficultés rencontrées par les études et notamment les limitations imposées par les caractéristiques des bases de données traitées. Il y a là également une source d'enseignement à exploiter.

5.2 1 Exploitation au niveau du réseau

Le LCPC développe actuellement des systèmes d'aide à la gestion de l'entretien routier dont l'un des objectifs prioritaires est l'optimisation des dépenses. Cette optimisation n'est réelle que si elle est étudiée sur le long terme, ce qui impose de pouvoir prévoir le comportement des chaussées soumises à certaines séquences d'entretien prédéfinies (y compris la séquence « ne rien faire »). Dans de tels systèmes, le rôle des modèles d'évolution des chaussées et la connaissance de l'effet des travaux d'entretien sur cette évolution sont essentiels.

Une des spécificités des outils mis au point au LCPC tient à la variété des réseaux routiers auxquels ceux-ci sont destinés. Le LCPC vise en effet les nombreux réseaux routiers départementaux tout autant que le réseau routier national. Or, sur ces réseaux locaux, les approches suivies par les gestionnaires, les indicateurs utilisés autant que les travaux réalisés, sont très divers, contraints par des considérations techniques, économiques tout autant que politiques qui, par nature, sont très locales. Il convient donc que les outils mis au point puissent s'adapter à ces réalités. En particulier, il est nécessaire que les modèles d'évolution soient ajustés sur le comportement des chaussées du réseau routier tel qu'il a été observé localement, c'est-à-dire, en

pratique, que ces modèles résultent d'une analyse des données contenues dans la base de données du gestionnaire. Concrètement, les systèmes développés par le LCPC doivent comprendre non pas des modèles d'évolution prédéterminés au niveau central, mais des modules d'analyse des données locales permettant de bâtir les modèles adaptés aux caractéristiques locales. La fiabilité, voire la précision, des modèles ainsi identifiés détermine de façon importante la confiance que les gestionnaires de réseaux routiers pourront accorder aux systèmes qui leur seront proposés.

De ce point de vue, le projet débouche clairement sur deux enseignements opérationnels :

- D'une part, la méthode des lois de survie a été améliorée et elle est devenue un instrument de modélisation plus sûr, comparable en performance aux méthodes de régression directe et indirecte. Son principal avantage sur cette dernière est qu'elle prend en compte toutes les données, et non pas uniquement les données obtenues sur des sections relevées plusieurs fois; sa mise en œuvre a été formalisée. Le LCPC a donc entrepris d'intégrer dans les systèmes qu'il développe un module d'identification des modèles d'évolution permettant d'appliquer cette méthode sans avoir systématiquement recours à un logiciel destiné aux spécialistes, tel que SAS.
- D'autre part, il apparaît que l'identification des variables explicatives et de leur rôle est une étape délicate; néanmoins, sous réserve que les données disponibles pour la modélisation soient de qualité suffisante, des modèles prédictifs exploitables peuvent être obtenus en utilisant le concept de robustesse. Là encore, les systèmes en cours de développement tireront parti de cette conclusion.

Il convient également de noter que les modèles qui seront établis grâce à cette méthode serviront à améliorer la qualité des données obtenues par interpolation entre deux campagnes d'auscultation [18]. Cela est particulièrement important sur les réseaux départementaux sur lesquels l'intervalle séparant deux campagnes est fréquemment supérieur ou égal à six ans.

5.2.2 Exploitation vis-à-vis du suivi de sections tests

Le projet a comporté une phase d'application des méthodes de modélisation à deux bases très différentes : une base de sections tests (MTQ) et une base de gestion de réseau (IQRN). Ces bases sont représentatives, de par leurs caractéristiques, de deux extrêmes :

- d'un côté, une base très bien documentée, mais comportant une population très peu nombreuse (MTQ);

- de l'autre côté, une base comportant une population nombreuse (150 000 sections), mais très succinctement documentée (IQRN).

Il ne fait pas de doute, à la suite du projet, que les modélisations les plus exploitables seraient obtenues à partir d'une base de données ayant des caractéristiques intermédiaires : une population assez nombreuse (quelques centaines de sections au moins) et documentée de façon complète et, surtout, pertinente.

Le LCPC pourrait engager une réflexion sur la constitution d'une nouvelle base de données, répondant mieux à ces spécifications. Il serait notamment judicieux de partir d'une base de données de gestion, telle que l'IQRN, ou d'une base départementale, et :

- d'y rechercher les sections les mieux documentées d'un point de vue des structures et des entretiens réalisés;
- de compléter au besoin ces sections par des essais en site là où des informations importantes manquent;
- de compléter les informations par des essais de laboratoires sur des échantillons prélevés en site;
- enfin, d'obtenir des données extérieures, notamment climatiques, auprès d'organismes spécialisés.

Même si on se limite à quelques centaines de sections, comme cela est suggéré ci-dessus, on conçoit immédiatement la lourdeur et le coût d'une telle démarche. Il conviendra donc, et c'est là l'un des enseignements du projet, de la faire précéder d'une réflexion approfondie sur les indicateurs dont on souhaite modéliser l'évolution et sur les variables qui peuvent, selon l'analyse métier, être les plus explicatives. Il serait en effet inutile de faire de gros efforts pour compléter une base dans laquelle manqueraient, de toute façon, certaines variables explicatives cruciales.

Une telle démarche ne peut, néanmoins, être entreprise que dans la mesure où des gestionnaires seront prêts à s'y associer.

6. CONCLUSION

Le programme de travail inscrit dans la convention a été conduit sur une période un peu plus longue que celle prévue, mais il a été respecté et les objectifs ont été atteints. Le présent rapport final constitue le dernier acte de ce projet.

Des difficultés sont survenues, mais elles ont été résolues, et ce traitement a permis de faire progresser de façon très importante les méthodes de modélisation employées. Dès les premières phases du projet, l'intérêt que présente une analyse préliminaire des données, par une approche métier s'aidant d'outils simples de statistique descriptive [6], était clairement apparu. Cette approche avait été intégrée dans les travaux suivants qui débouchèrent sur la production des premiers modèles applicables aux chaussées flexibles non entretenues. La comparaison de ces modèles, dans le courant de 2002, et le constat des différences qui s'en est suivi ont conduit à aller plus loin dans l'amélioration des méthodes de modélisation. Les outils mis au point conformément à la méthode statistique indirecte, notamment, ont été remplacés par des techniques plus lourdes mais plus fiables : technique itérative pour ajuster le modèle sur chaque section, technique de régression multiple linéaire systématiquement employée pour identifier les variables explicatives. La méthode des lois de survie a, quant à elle, été modifiée pour éliminer les incohérences qui subsistaient dans ses résultats. La méthode des classes, inadaptée à des bases aussi restreintes n'a pas été testée, mais une méthode de régression dite « non linéaire directe » a été mise en œuvre par le MTQ. Au total, les méthodes ont été nettement renforcées, ce qui était l'un des objectifs essentiels du projet.

L'impact de ces modifications de méthode sur les modèles a été étudié, en se concentrant *in fine* sur la fissuration de fatigue. Cette dégradation a été modélisée, par les trois méthodes, tant sur les chaussées non entretenues que sur les chaussées entretenues. Les modèles obtenus, qui traduisent de façon plus précise et plus réaliste les observations sur lesquelles ils sont basés, conduisent toutefois à des conclusions, en ce qui concerne l'identification de variables explicatives, qui restent insuffisamment robustes, même si on observe une convergence des conclusions sur certaines variables clés. C'est indiscutablement un autre enseignement du projet : les méthodes statistiques sont moins efficaces pour identifier, de façon stable et robuste, les variables explicatives les plus significatives, lorsqu'elles sont appliquées à des populations trop clairsemées. Il y a là des conclusions à tirer sur la conception et la préparation des programmes de suivi de sections tests dans l'avenir.

Toutefois, les modèles obtenus permettent de quantifier, à court et moyen terme, l'évolution probable de la dégradation, surtout grâce au concept de robustesse, ce qui permet d'envisager l'espacement des campagnes de collecte de données. De plus, il a été possible de bien montrer comment les modèles de comportement obtenus peuvent s'insérer dans une étude

comparative de stratégies d'entretien. Ce projet a permis de développer des modèles de performance plus efficaces, permettant d'améliorer le comportement des chaussées.

ANNEXE I
LISTE DES DOCUMENTS PRODUITS

A1 – Rapports d'études

[1] Présentation du projet de coopération franco-québécois *Établissement des modèles de performance des chaussées*, juin 2000.

[2] *Convention de collaboration de recherche*, juin 2000.

[3] *Méthode pour modéliser l'évolution d'une dégradation de chaussée à partir d'une base d'observation en site*, version 3.0, novembre 2001.

[4] Description des variables contenues dans la base de données *Suivi de performance des chaussées – MTQ*, juin 2000.

[5] *Rapport annuel d'activité 2000*, mars 2001.

[6] Analyse préliminaire des variables de la base de données *Chaussées avant intervention d'entretien*, juillet 2001.

[7] *Identification des lois de dégradations de chaussées – Application de la méthode des lois de survie*, octobre 2001.

[8] *Rapport annuel d'activité 2001*, janvier 2002.

[9a] *Identification de modèles d'évolution par méthode statistique indirecte, avec régression pas à pas*, juin 2002.

[9b] *Application de la méthode de régression PLS à l'identification des lois d'évolution des dégradations de chaussées*, juillet 2002.

[9c] *Identification de modèles d'évolution par régression non linéaire multi variables (méthode directe)*, novembre 2002.

[10] *Analyse préliminaire des variables de la base de données des sections avec resurfage*, juin 2002.

[11] *Rapport annuel d'activité 2002*, décembre 2002.

[12] *Application de la méthode des Lois de survie améliorée à l'identification de modèles d'évolution de la fissuration de fatigue*, août 2003.

[13a] *Identification de modèles d'évolution de la fissuration de fatigue par régression indirecte*, décembre 2002.

[13b] *Identification de modèles d'évolution de la fissuration de fatigue par régression directe*, octobre 2004.

[14] *Analyse technico-économique intégrant plusieurs cycles d'intervention*, novembre 2004.

[15] *Rapport final*, novembre 2004.

A2 – Publications

[16] LEPERT, P., Y. SAVARD, D. LEROUX et M. RÈCHE « Modèles de performance des chaussées », *Innovation Transports*, numéro 11, MTQ, octobre 2001.

[17] LEPERT, P., Y. SAVARD, D. LEROUX et M. RÈCHE « Modèles de performance des chaussées », *Notes d'information Bulletin de Liaison des Laboratoires*, n° 234, février 2002.

[18] LEPERT, P., D. LEROUX et Y. SAVARD. « Use of pavement performance models to improve efficiency of data collection procedures », *3rd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, Guimaraes, Portugal, July 2003.

[19] LEROUX, D., P. LEPERT, M. RÈCHE et Y. SAVARD. « Pavement Performance Modeling : Comparison of Three Methods », *Transport Research Board Meeting*, Washington, USA, 12-14 January 2004.

[20] SAVARD, Y., P. LEPERT, D. LEROUX, K. DE BLOIS et M. RÈCHE. « Development of Pavement Performance Model from Test Sections Database – Application », *2nd European Pavement and As. Manag. Conf.*, Berlin, Allemagne, March 2004.

[21] RÈCHE, M., A. VERGNE et P. LEPERT. « Impact of maintenance treatments on pavement cracking models », *5th Rilem*, Limoges, France, May 2004.

[22] SAVARD, Y., D. LEROUX, K. DE BLOIS et P. LEPERT. « Use of Performance Models for Pavement Design », *SURF 2004*, Toronto, Canada, June 2004.

[23] SAVARD, Y., D. LEROUX, K. DE BLOIS, N. POULIOT, P. LEPERT et M. RÈCHE. « Amélioration de la performance des chaussées souples 1992 – 2002 (construction ou reconstruction) », *Congrès AQTR 2004*, Québec.

[24] LEPERT, P., Y. SAVARD, D. LEROUX et M. RÈCHE. « Méthodes statistiques de prévision de l'évolution d'une chaussée », *Bulletin des LPC* n° 250-251, 19 p., 2004.

A3 – Productions auxquelles le projet a contribué

[25] M. RÈCHE. *Effet des travaux d'entretien sur l'évolution des dégradations de chaussées*, Thèse de l'Université Blaise Pascal – Clermont - Ferrand II, novembre 2004.

[26] *Séminaire sur la modélisation de l'évolution des dégradations de chaussées*, Nantes, 16 novembre 2004, CD-ROM.

ANNEXE II
BILAN ET RETOMBÉES DU PROJET

AI.1 Moyens engagés

Le MTQ et le LCPC ont engagé un montant total de 700 000 \$ CA (437 500 €) entre 2000 et 2004 pour réaliser le projet. Le budget initial prévu pour ce projet était de 510 000 \$ CA (362 050 €) pour la période 2000-2002. Les difficultés survenues au cours de la recherche ont demandé un peu plus de temps pour atteindre les objectifs.

La Commission Permanente France – Québec a financé au cours de la période 2000-2003 un total de 13 missions en France et au Québec d'une durée d'une semaine chacune correspondant à un montant total d'environ 26 000 \$ CA (16 250 €).

AI.2 Retombées du projet

Les principaux objectifs du projet ont été atteints. Il s'agit notamment :

- de statuer sur la meilleure méthode à utiliser pour élaborer des modèles de performance plus précis pour prévoir le comportement des chaussées (utilisation dans les systèmes de gestion des chaussées);
- d'optimiser les données à recueillir (variables importantes) sur le réseau et de diminuer la fréquence des campagnes de relevés (modèles pour vieillir artificiellement le réseau);
- d'élaborer une méthode d'analyse –coût-avantage incorporant plusieurs cycles d'intervention;
- d'établir le rapport avantages vs coûts de différentes techniques et fixer des objectifs de performance;
- d'orienter les contrôles en chantier et les besoins en recherche et développement.

Il s'agit d'une contribution scientifique majeure apportée par les chercheurs francophones des deux organismes dans un domaine prometteur et en plein essor sur le plan international. Les résultats de cette recherche peuvent également être utilisés en milieu municipal, par l'entreprise privée et les autres organisations internationales.

