

Gestion technico-économique des infrastructures routières

Philippe LEPERT

Laboratoire central
des ponts et chaussées
philippe.lepert@lcpc.fr

RÉSUMÉ

Le système d'aide à la gestion de l'entretien « GiRR » (gestion des réseaux routiers), développé au milieu des années 1990, s'avère aujourd'hui insuffisant pour répondre aux demandes d'évaluation des retombées socio-économiques des politiques d'entretien qui s'exercent de façon croissante auprès des gestionnaires de réseaux routiers. En collaboration avec le ministère des Transports du Québec, le LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées) a adapté différentes méthodes statistiques à l'identification des lois d'évolution des chaussées. L'introduction du concept de « robustesse » a permis d'améliorer sensiblement ces méthodes et on dispose maintenant de modèles permettant d'évaluer les politiques d'entretien sur les moyen et long termes. Parallèlement, les recherches sur les modèles d'analyse économique ont produit leurs premiers résultats. Le cadre conceptuel d'analyse économique a été posé et certains modèles bien adaptés au contexte des pays industrialisés ont été proposés, par exemple un modèle de calcul des surcoûts d'usage induits par les chantiers d'entretien. Ces recherches ont permis de concevoir un système d'aide à la gestion de l'entretien dit « de seconde génération », Programme-Plus, qui permet d'étudier les conséquences techniques et financières de différentes politiques d'entretien, de retenir la plus adaptée et de l'appliquer à une programmation pluriannuelle.

Technical and economic management of road infrastructure

ABSTRACT

The Pavement Management System "GiRR" (French acronym for road network management), developed during the mid-1990's, today proves insufficient in satisfying the increasing requests placed upon facility managers to evaluate the socioeconomic benefits of road maintenance policies. In collaboration with the Quebec Ministry of Transportation, the LCPC Laboratory has adapted various statistical methods for identifying pavement evolution laws. Introduction of the concept of "robustness" has significantly improved these methods; nowadays, models are available that enable evaluating maintenance policies over both the medium and long-term. In conjunction with these efforts, research on economic analysis models has begun yielding results. The conceptual scope of such economic analyses has been framed and models adapted to the context of industrialized countries have been proposed; one example consists of a model for computing the additional user costs induced by road maintenance projects. This research has served to design a so-called "second-generation" maintenance management aid system, Programme-Plus, which makes it possible to study the technical and financial consequences of various maintenance policies, select the best adapted, and then apply it to a multiyear schedule.

INTRODUCTION : LA GESTION DE L'ENTRETIEN DES ROUTES

■ Problématique de la gestion de l'entretien routier

Dès la plus haute antiquité, et surtout avec l'invention de la roue, les sociétés humaines ont réalisé que les efforts consentis pour construire et entretenir des routes étaient largement payés de retour par les facilités que celles-ci offraient pour les déplacements de personnes et les échanges de marchandises. Ainsi, les routes sont d'abord une réponse à un besoin économique et social. Leur détérioration – sous les effets combinés du trafic et des intempéries – pourrait aller jusqu'à la disparition de leur intérêt socio-économique. Il faut donc entretenir les routes, c'est-à-dire réaliser, au bon moment et au bon endroit, des travaux appropriés. Deux considérations guident les décisions d'entretien :

- les avantages « produits » par une route, qui résultent, en particulier, de la réduction des temps de transport et d'une amélioration de la sécurité et/ou du confort des déplacements, varient selon la fonction et le trafic de cette route. Le maintien en parfait état d'une chaussée sur laquelle circulent peu de véhicules serait trop coûteux par rapport aux avantages qu'il engendrerait. À l'inverse, les conséquences socio-économiques d'une perte de fonctions d'un axe routier majeur seraient hors de proportion avec le coût d'un entretien adapté. L'effort d'entretien d'une route doit donc s'apprécier selon la fonction de la route et l'importance de son trafic ;
- n'intervenir que lorsque les dégradations ont atteint un stade qui affecte les fonctions de la route n'est pas nécessairement la réponse la plus efficace. Les dégradations des chaussées, qui sont les symptômes perceptibles de leur endommagement, sont des phénomènes cumulatifs qui, souvent, s'auto-amplifient. Par exemple, les fissures de surface d'une chaussée laissent entrer l'eau dans son assise, ce qui la fragilise et accélère le développement de ces fissures. Pour cette raison, une intervention précoce peut être plus efficace – en même temps qu'elle est plus souple dans sa programmation et moins chère dans sa réalisation – qu'une intervention tardive.

Vu ainsi, les questions « Où, quand et comment faut-il intervenir ? » apparaissent donc, à juste titre, complexes. Il faut d'abord identifier l'importance de chaque route – et souvent de chaque tronçon de route – et, en fonction de cette importance, définir l'état optimal (c'est-à-dire le niveau de service) qu'il faut y maintenir. Il s'agit ensuite de déterminer les interventions nécessaires pour maintenir cet état de façon durable et au moindre coût. C'est la complexité même de ce problème, qui recouvre de nombreux aspects (comportement à court, moyen et long termes des chaussées, effet des techniques d'entretien, analyse socio-économique, etc.) qui justifie, *in fine*, le développement et l'utilisation des systèmes d'aide à la décision pour l'entretien routier. Corollairement, l'intérêt de ces systèmes tient à leur capacité à aborder correctement tous les aspects de cette problématique.

■ Organisation et pratiques « traditionnelles »

Les organisations qui se sont mises en place en France, au cours des années 1970, pour gérer les réseaux routiers nationaux et départementaux, et les pratiques qu'elles ont développées ont peu évolué, du moins jusqu'en 2006. Ces organisations s'articulent en trois niveaux, bien illustrés sur le réseau routier national (RRN) :

- la Direction des routes (DR), qui a pour rôles de « porter » une politique routière, avec ses composantes d'entretien et de réhabilitation, de la faire partager à la représentation nationale, d'obtenir les moyens budgétaires de sa mise en œuvre et de les répartir entre les directions départementales de l'Équipement (DDE) ;
- les DDE, qui emploient ces budgets pour mettre en œuvre la politique routière ; à ce titre, elles sont forces de propositions d'entretien ;
- les subdivisions, ensemble d'unités de terrain dans chaque département, qui connaissent parfaitement les routes de leur zone d'action, y pratiquent l'entretien courant, et organisent et suivent les travaux d'entretien programmés.

Dans les décennies 70 et 80, au printemps, les subdivisions communiquaient à leur DDE la liste des interventions d'entretien qu'elles jugeaient nécessaires dans leurs zones. Ces propositions faisaient l'objet d'une évaluation s'appuyant essentiellement sur une visite de chaque section par le responsable de la gestion des routes (RGR) de la DDE, accompagné d'un expert du centre d'études techniques de l'Équipement (CETE), chacun ayant en main les mesures, notamment de déflexion, d'uni et d'adhérence, effectuées dans le cadre de campagnes d'auscultation nationales et rassemblées au sein de la Banque de données routières (BDR). Suite à ces visites, les interventions proposées par les départements étaient regroupées et classées par priorité par les CETE qui les transmettaient à la Direction des routes. Celle-ci faisait une dernière consolidation des listes envoyées par les huit CETE, avant de décider et de renvoyer vers les DDE les programmes d'entretien acceptés.

Cette pratique présentait l'avantage d'impliquer et de responsabiliser les différents acteurs de la gestion de l'entretien routier. Elle comportait toutefois deux fragilités : le choix de travaux (où, quand et comment intervenir ?) relevait d'une démarche trop peu formalisée (malgré l'encadrement par le guide de l'entretien préventif [1]), donc peu lisible, ce qui compliquait les choix de priorité entre les propositions des départements et, plus encore, au stade suivant, entre les propositions des régions ; par ailleurs, l'expertise était difficilement transmissible, donc volatile à moyen terme.

■ La contractualisation et le système de première génération

Ce dispositif a sensiblement évolué au début des années 1990, au profit d'une pratique dite de « contractualisation ». Depuis lors, chaque année, la Direction des routes attribue à chaque DDE un budget annuel d'entretien, au *prorata* de la surface de chaussées qu'elle gère dans chaque catégorie fonctionnelle (les routes du RRN sont réparties en cinq catégories). La DDE emploie ce budget selon une démarche dont elle est maîtresse, à charge pour elle de maintenir les routes nationales (RN) dans un état approprié. La Direction des routes exerce un suivi direct des résultats par le biais d'opérations triannuelles de relevé d'état des routes, dites « images qualité des routes nationales » (IQRN) [2]. Les CETE, dans ce schéma, prennent un rôle de conseillers des DDE, qui n'ont toutefois pas l'obligation de faire appel à eux.

Cette évolution a favorisé et orienté le développement d'un système d'aide à la gestion de l'entretien routier, dit de première génération, comportant un module d'évaluation pour permettre à la Direction des routes d'exercer son suivi, et un module d'aide à la programmation utilisable par les DDE – et, en pratique, plutôt par leurs conseillers, les CETE – pour déterminer leur programme d'entretien. Ce système, nommé GiRR, fut donc plus conçu comme un outil technique devant répondre à cette double problématique (évaluation – programmation) que comme un moyen de gestion prévisionnelle traitant des aspects prédictifs, sociaux et économiques d'une telle gestion.

DE LA PREMIÈRE À LA SECONDE GÉNÉRATION DE SYSTÈMES D'AIDES À LA GESTION

■ Bref historique

Premier système informatisé portant sur le RRN français, la BDR centralisait les informations décrivant les routes, leur structure, leur trafic et leur état, ce dernier aspect provenant de campagnes systématiques de mesures de déflexion, d'uni longitudinal et d'adhérence. Ces informations étaient reportées sur des schémas d'itinéraire, qui étaient envoyés aux DDE et aux CETE pour les aider à bâtir leurs propositions de travaux d'entretien, mais la BDR ne comportait pas de logiciels d'analyse des données.

Premier véritable système de gestion de l'entretien routier, GiRR fut développé à partir de 1991 dans le cadre de la mise en place de la contractualisation DR-DDE, puis mis en service entre 1992 et 1996. Il comprend deux modules fonctionnels, l'un d'évaluation de l'état des chaussées, l'autre d'aide à la programmation des travaux. On trouvera dans ce qui suit et dans d'autres publications

[3-5] une description détaillée des principes et du fonctionnement de ces modules. Plusieurs versions de ce système ont été produites jusqu'en 2002, date à laquelle sa configuration a été figée pour l'essentiel (en dehors du développement d'une version pour les pays en transition).

■ Approche critique du système GiRR

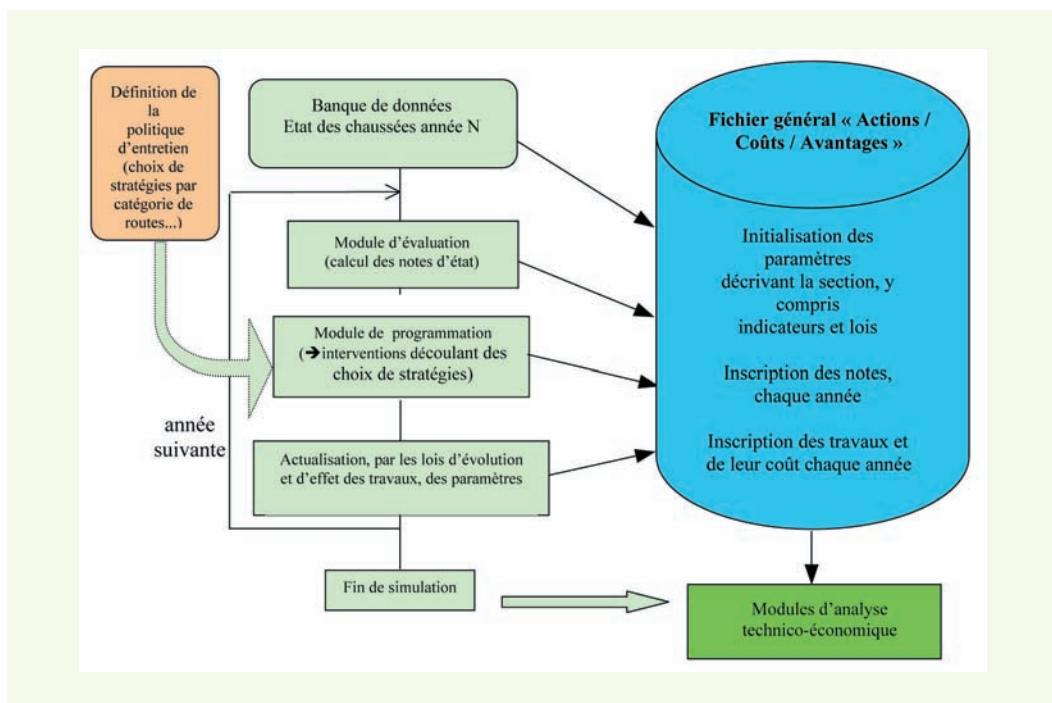
- « **Évalue** », le premier module de GiRR, permet au service central d'un gestionnaire (par exemple, la DR, pour le RRN) d'exercer un suivi de ses chaussées selon deux critères : l'état de la structure et l'état de la surface. S'appuyant sur des relevés visuels de dégradations de surface, des mesures d'uni transversal et des mesures d'adhérence, ce module calcule, pour chaque section de route de 200 m, une note dite « de structure » et une note dite « de surface ». Chacune de ces deux notes, qui varient entre 0 (chaussée détruite) et 20 (chaussée neuve), caractérise de façon synthétique – et très accessible aux gestionnaires – l'état des chaussées au moment où ont été exécutés le relevé et les mesures. En revanche, GiRR-Évalue ne permet pas d'actualiser les notes une ou plusieurs années après ces relevés. De ce fait, lorsque l'on ausculte un réseau par portion (un tiers chaque année sur le RRN), on est amené à considérer ensemble des notes caractérisant l'état des routes à l'année N (pour 1/3 du réseau), à l'année N-1 (pour 1/3 du réseau) et à l'année N-2 (pour le dernier 1/3 du réseau). Ajoutons que, même s'il est en théorie possible d'établir des lois d'évolution des notes synthétiques, ces lois n'ont en réalité pas grande signification. En effet, de par son mode de calcul, une même note (13/20, par exemple) peut traduire des états de chaussées très variables (fissurés ou déformés), résultat de la progression de phénomènes de détérioration très différents qui n'évoluent pas de la même façon. Les lois d'évolution établies en l'absence d'une connaissance des phénomènes mis en œuvre dans la chaussée, faute d'informations physiques détaillées comme en procurent les indicateurs élémentaires, ne représentent qu'une solution « faute de mieux ».
- « **Programme** », le second module de GiRR, établit, à partir du même type de données mais par une analyse plus détaillée, les propositions de travaux résultant de l'application de stratégies d'entretien choisies par le gestionnaire. Il met en priorité ces propositions et construit ainsi une ébauche de programme d'intervention. Celui-ci peut être étalé sur plusieurs années pour respecter les budgets annuels, mais il faut souligner qu'en toute rigueur, les propositions de travaux sont pertinentes pour l'année où le relevé et les mesures ont été faits. Certes, elles peuvent rester valables une ou deux années après, mais perdent rapidement leur pertinence au-delà. De plus, GiRR-Programme ne comporte pas de modèle permettant de caractériser l'effet des travaux d'entretien. Il n'est donc pas possible de simuler la mise en œuvre de stratégies d'entretien sur une période de plusieurs années, alors qu'une telle simulation représente un passage obligé pour comparer différentes stratégies d'entretien et évaluer leur efficacité au plan socio-économique.

■ Conception d'un système de seconde génération

On peut assez directement déduire du système de première génération un concept de système de seconde génération (**figure 1**), qui permet de prolonger les simulations et les analyses sur des périodes plus longues. À partir des informations qui caractérisent le réseau routier lors d'une année donnée, référencée ci-après comme « l'année N », et, en particulier, des données obtenues par des campagnes d'auscultation cette année-là, le système établit les notes d'état à l'année N et le projet de programme de travaux à l'année N + 1. On fait alors l'hypothèse que ce programme est appliqué et on simule l'évolution des chaussées au cours de l'année N + 1. À cette fin, on applique les lois d'évolution des indicateurs sur les sections qui n'ont pas été entretenues, et les lois d'effet des travaux sur celles qui l'ont été. On dispose alors des données d'état du réseau à l'issue de l'année N + 1, grâce auxquelles le système peut établir les notes cette année-là et le programme de travaux pour l'année N + 2. On réitère alors sur la période définie, généralement de 5 à 20 ans.

Ce concept permet effectivement de simuler l'application d'une politique d'entretien (ensemble de stratégies mises en œuvre sur les différentes catégories de routes du réseau) sur plusieurs années, d'en évaluer les impacts financiers, techniques et socio-économiques (voire environnementaux) à

figure 1
Principe du système de seconde génération.



court, moyen et long termes. D'autres approches de la simulation d'entretien peuvent être conçues, mais il est clair que le passage du système de première génération à des approches telles que celle illustrée par la **figure 1** tient d'abord à l'introduction des lois d'évolution des chaussées en l'absence de travaux et des lois d'effet des travaux. Il suppose également des capacités d'analyse des retombées technico-socio-économiques de l'entretien. En d'autres termes, il faut disposer des modèles permettant de quantifier et, le cas échéant, de monétariser ces effets.

C'est au développement de ces lois d'évolution des chaussées, lois d'effet des travaux et modèles d'analyse technico-économique qu'a été consacrée l'opération de recherche du LCPC « Gestion technico-économique des infrastructures routières » [6] et les projets qui y étaient rattachés, tels que le projet sur les modèles de performances des chaussées mené en coopération avec le ministère des Transports du Québec (MTQ) [7], ou les actions « Reduction in Road Closures by Improved Pavement Maintenance Procedures » (COST 343) et « Fully Optimized Road Maintenance » (FORMAT) conduites dans le cadre des programmes européens. Sans reprendre *in extenso* les développements qui ont été présentés dans des articles qui leur étaient entièrement consacrés ([8-13], il convient, pour avoir une vision d'ensemble cohérente, de reprendre l'essentiel des résultats obtenus dans ces projets.

DÉVELOPPEMENT DES LOIS D'ÉVOLUTION DES DÉGRADATIONS

On ne rappellera jamais assez l'importance des lois d'évolution des dégradations de chaussées dans l'optimisation des dépenses d'entretien. Si ces lois sous-estiment la vitesse d'évolution des dégradations, ce sont les besoins d'entretien à venir qui seront sous-évalués et les budgets prévus seront insuffisants. Une telle erreur se manifestera sur le terrain, au bout de quelques années, par des dégradations plus graves que prévu et dont la correction sera alors plus coûteuse. C'est finalement toute la politique d'entretien définie par le maître d'ouvrage pour les 15 ou 20 ans à venir qui sera inappropriée. L'inverse (surestimation des vitesses d'évolution) n'est pas moins grave. Le même raisonnement s'applique aux lois d'effet des travaux. Un effort particulier a donc été consenti par le LCPC et ses partenaires pour étudier des méthodes de modélisation permettant de bâtir des lois fiables.

■ Lois d'évolution des dégradations de chaussées

Les véhicules lourds qui empruntent une chaussée induisent des contraintes dans ses différentes couches, contraintes d'autant plus intenses que les charges sont lourdes et le sol support peu rigide, et d'autant plus nombreuses que le trafic est important. L'accumulation des cycles de contraintes entraîne l'endommagement de ces couches, essentiellement sous forme de déformations irréversibles dans les sols et les matériaux non traités, de micro-fissuration et de décohésion dans les matériaux traités et de rupture au niveau des interfaces entre couches collées [14]. Ces endommagements s'amplifient et se traduisent, au-delà d'un certain stade, par des dégradations perceptibles depuis la surface (fissurations, déformations). Dès leur apparition, ces dégradations peuvent accélérer les processus d'endommagement interne, entamant ainsi un cercle vicieux qui finit par affecter les fonctions essentielles de la route (sécurité, confort, vitesse de trajet).

La nature des relations entre la nature et le niveau des endommagements internes, d'une part, et l'apparition et le développement des dégradations¹ en surface, d'autre part, restent largement à éclaircir. Ce que l'on en sait permet toutefois de comprendre que certaines caractéristiques de la chaussée, de son support et des sollicitations auxquelles elle est soumise (trafic, climat) déterminent l'apparition et l'évolution des endommagements, donc des dégradations. En d'autres termes, les lois d'évolution des dégradations sont nécessairement influencées par certaines caractéristiques de la route, et doivent prendre la forme :

$$V(t) = F(t, \alpha_1, \alpha_2, \dots, C_1, C_2, C_3, \dots) \quad (1)$$

où V est un indicateur de dégradation, α_i des coefficients de la loi, C_i les caractéristiques de la route et des sollicitations qui influencent l'évolution de V . Les relations de type (1) sont les lois d'évolution des dégradations. Les caractéristiques C_i sont appelées variables explicatives.

L'identification des lois d'évolution des indicateurs d'état des chaussées, de leurs coefficients et de leurs variables explicatives, est essentiellement fondée sur l'analyse statistique des valeurs prises par ces indicateurs sur des chaussées semblables dans le passé. Ces valeurs proviennent de campagnes d'auscultation entreprises par les gestionnaires sur leur réseau.

■ Loi d'effet des travaux d'entretien

Les travaux d'entretien visent, soit à enrayer les phénomènes d'auto-amplification des endommagements et des dégradations, soit à réparer la chaussée lorsque ses fonctions menacent d'être affectées. Dans le premier cas, on parle plutôt d'entretien préventif et, dans le second cas, d'entretien curatif (bien que la distinction ne soit pas aussi franche). Dans tous les cas, les travaux d'entretien agissent sur l'état de la route, donc sur les valeurs des indicateurs. Généralement, cette action se caractérise par deux effets :

- une modification à court terme de la valeur de l'indicateur ; par exemple, l'étendue des fissurations et des déformations est remise à zéro ; cette modification peut dépendre du dimensionnement des travaux (par exemple, l'épaisseur d'une couche de renforcement influence la valeur prise par la déflexion) ;
- une modification, à moyen et long terme, de son évolution : la loi (1) devient alors :

$$V'(t) = F'(t, \alpha'_1, \alpha'_2, \dots, C'_1, C'_2, C'_3, \dots) \quad (2)$$

L'évolution d'un indicateur après des travaux dépend souvent de coefficients α'_i et de variables explicatives (C'_i) qui ne sont pas les mêmes que ceux et celles qui gouvernent cette évolution avant les travaux. De plus, on est parfois (pour les fissurations, notamment) amené à distinguer deux phases dans cet épisode, l'une, plus rapide que l'évolution avant entretien, jusqu'à la réapparition des

¹ Dans ce qui suit, on emploiera le terme d'*endommagements* pour désigner des phénomènes internes à la chaussée et de *dégradations* pour désigner les phénomènes perceptibles depuis sa surface.

dégradations, la suivante, plus lente que l'évolution avant travaux, qui correspond à une extension supplémentaire des dégradations.

Cette seconde modification est la plus difficile à caractériser. Certes, les experts ont une certaine connaissance de l'effet des techniques d'entretien. Toutefois, si l'on veut aller au-delà et appliquer une démarche rigoureuse, il faut conduire le même travail que pour l'identification des lois d'évolution avant travaux, en se fondant, cette fois, sur des valeurs d'indicateurs recueillies sur des chaussées entretenues.

■ Bases de données

Lorsqu'un gestionnaire décide d'appliquer des procédures modernes d'entretien sur son réseau, il doit d'abord constituer une base de données décrivant ce réseau, et comportant notamment les informations décrivant l'état des chaussées, section par section. On trouve, dans ces bases, un grand nombre de sections couvrant, si l'auscultation est exhaustive, toutes les familles de chaussées et toutes les conditions de fonctionnement existant sur le réseau. En revanche, les informations sont assez condensées, voire sommaires, d'une part, parce qu'elles sont avant tout destinées à des études globalisantes (évaluation) ou approchées (programmation) et, d'autre part, parce que devant être recueillies sur l'ensemble du réseau, elles le sont avec des appareils plus rapides mais moins précis que ceux utilisés, par exemple, pour le suivi des sections tests. Par ailleurs, il est rare que l'on dispose dans ces bases de valeurs fiables pour les variables explicatives potentielles des phénomènes à modéliser (caractéristiques des matériaux de chaussées, par exemple) sur la totalité du réseau. Certaines variables en sont même totalement absentes.

La banque de données constituée pour évaluer le RRN français constitue un bon exemple de ce type de base. Elle porte sur 30 000 km de route [15] et est alimentée par les campagnes d'auscultation IQRN. Chaque année depuis 1993, un tiers du réseau est ausculté, de sorte que l'on dispose aujourd'hui de trois relevés sur chacune des 150 000 sections de 200 m qui représentent l'ensemble du réseau. On connaît assez bien les types de structures de chaussée en place (NT : assise non traitée ; GH : assise en grave hydraulique (semi-rigide) ; GB : assise en grave-bitume), et même le nombre de couches, le type de matériau et l'épaisseur de chaque couche sur une fraction significative de ces sections. En revanche, les informations sur le trafic sont sommaires et il n'y en a pratiquement pas sur les caractéristiques mécaniques des matériaux ou du sol.

■ Méthodes d'analyse statistique

Les méthodes d'analyse qui sont appliquées à ces bases pour identifier les lois d'évolution des chaussées doivent tenir compte de ces restrictions, pour tirer le meilleur parti des données disponibles. Un programme de recherche [8, 9], mené conjointement par le LCPC et le Laboratoire des chaussées du MTQ (LC-MTQ), a permis de comparer plusieurs méthodes que ces laboratoires avaient développées pour déterminer les lois d'évolution avant et après travaux :

- une méthode de régression indirecte, consistant à ajuster, par une procédure itérative, une courbe d'équation prédéfinie sur les observations faites sur chaque section, puis à déterminer une relation entre les coefficients de cette courbe et les variables caractérisant les sections (variables explicatives) ;
- une méthode de régression directe non linéaire, dans laquelle une équation intégrant directement les variables explicatives pressenties est calée en exploitant toutes les observations disponibles sur l'ensemble des sections ;
- une méthode analytique, dite « des classes », dans laquelle les observations sont réparties dans des classes correspondant à des états emboîtés ($V = 0$, $V < 5\%$, $V < 10\%$, etc.) ; les fonctions de répartition, $P_r(t, V)$, qui donnent la probabilité qu'une section soit encore dans une classe à un âge donné, forment un abaque expérimental ; c'est en ajustant sur celui-ci un abaque théorique qu'on obtient les paramètres du modèle ;

- une méthode dérivée de la théorie des lois de survie, dans laquelle on cherche à caractériser la probabilité qu'un indicateur franchisse des seuils successifs, selon l'âge de la section.

Pour les trois premières méthodes, il faut présupposer la forme de la courbe d'évolution, c'est-à-dire son équation. La quatrième méthode permet, en théorie, de s'affranchir de cette hypothèse, encore que l'on montre qu'en pratique, il vaut mieux, là aussi, fixer *a priori* la forme de la courbe (généralement, une fonction de Weibull) pour éviter certains artefacts. On trouvera un descriptif assez complet de ces travaux et de leurs résultats dans [8]. On se borne à en rappeler ici les conclusions essentielles :

- les **bases de données** auxquelles on applique les méthodes doivent être soigneusement vérifiées et les données aberrantes (par exemple, décroissance des dégradations sans entretien) écartées, avant d'engager l'analyse statistique ;
- d'une façon générale, l'introduction des **connaissances métiers** dans la démarche, tant au niveau de la sélection des variables potentiellement explicatives qui sont testées par voie statistique² que pour interpréter les résultats de ces tests, est un facteur de réussite important dans la modélisation. Il ne faut pas se reposer « aveuglément » sur des méthodes d'analyse statistiques pour identifier, *ex-nihilo*, les variables explicatives de l'évolution d'une dégradation ;
- il n'est jamais possible d'identifier toutes les variables explicatives d'une loi d'évolution ; on y pallie en partie en introduisant le **concept de robustesse**. La robustesse d'une section, vis-à-vis d'un indicateur donné, est un facteur de ralentissement ou d'accélération du temps qui explique les observations faites sur cette section particulière. Ce concept permet de prendre en compte, dès que l'indicateur a commencé à évoluer, l'influence globale des variables explicatives non identifiées ; il améliore significativement le caractère explicatif et prédictif de ces lois qui prennent la forme suivante, si R est la valeur calculée pour la robustesse de la section :

$$V(t) = F(t, \alpha_1, \alpha_2, C_1, C_2, R) \quad (3)$$

- il est possible de normaliser R pour que sa valeur soit toujours comprise entre 0 (chaussée très fragile par rapport à la moyenne des chaussées de même structure) et 1 (chaussée très solide par rapport à la même moyenne) ;
- le fait de construire les lois d'évolution par **analyse des données locales**, c'est-à-dire recueillies depuis des années sur le réseau où ces lois seront ensuite appliquées, est aussi un moyen d'intégrer implicitement les facteurs influents locaux, et notamment le climat, ou certaines spécificités des techniques de construction et d'entretien.

Par ailleurs, il est possible de classer ces quatre méthodes selon plusieurs critères de puissance ([tableau 1](#)).

tableau 1
Comparaison des méthodes de modélisation.

Critère	Régression indirecte	Régression directe	Méthode des classes	Méthodes des lois de survie
Prend en compte toutes les observations	Non	Oui	Oui	Oui
Intègre l'état de dépendance entre observations faites sur la même section	Oui	Non	Non	Non ¹
Intègre l'identification directe des variables explicatives	Oui	Oui	Moins fine	
Produit directement une évaluation du degré de contribution des variables explicatives	Oui	Oui ²	Moins fine	Oui

1 : Évolution possible vers une prise en compte de cet état.

2 : Par ordonnancement des modèles.

² Ainsi, cette analyse métier permet de créer des « variables de dimensionnement », souvent plus explicatives que les variables physiques ; c'est le cas, par exemple, du rapport entre le trafic réel et le trafic de dimensionnement.

En outre, l'application à des observations réelles provenant du programme de suivi de sections tests du MTQ a permis d'évaluer les performances de trois d'entre elles – la méthode des classes, applicable à des échantillons larges, n'a pas été appliquée dans ce contexte – vis-à-vis de deux critères d'efficacité [9] :

- la capacité, pour une loi, de reproduire les observations à partir desquelles elle a été établie : elle est caractérisée par le pourcentage de cas où la loi restitue la valeur des observations d'origine à $+/- 15\%$;
- la capacité, pour une loi, de prévoir une observation qui n'a pas servi à l'établir : elle est caractérisée par le pourcentage de cas où la loi donne la valeur des observations faites *a posteriori* à $+/- 15\%$.

Ces performances sont clairement améliorées par le concept de robustesse ([tableau 2](#)).

tableau 2
Performances des méthodes avec et sans robustesse (d'après [9])
En grisé, les cas n'ayant pas de sens.

Critère	Régression indirecte	Régression directe	Méthodes des lois de survie
Modélisation sans robustesse	69 %	78 %	
Prédiction sans robustesse	25 %	42 %	
Modélisation avec robustesse	88 %	97 %	97 %
Prédiction avec robustesse	33 %	42 %	33 %

En prenant en compte la robustesse, la qualité de reproduction devient excellente, la qualité de prédiction – qui est la propriété exploitée par les systèmes de gestion – étant améliorée mais encore améliorable. Comme on le verra plus loin, c'est dans l'amélioration des bases de données et de leur contenu qu'il faut rechercher cette amélioration.

Enfin, des applications menées sur la base de données du RRN [10] ont montré que l'application de la méthode de régression indirecte était très sensible à la qualité de la base, et notamment au suivi de son référentiel dans le temps. On a vu, en effet, que le principal intérêt de cette méthode tenait à sa capacité à prendre correctement en compte les séries d'observations effectuées sur les mêmes sections. Si plusieurs observations censées avoir été faites sur une même section proviennent, en fait, de sections différentes, par suite d'une évolution de référentiel non reportée, l'analyse sera biaisée et les lois produites moins fiables.

On retient de cette analyse qu'il n'y a pas vraiment une méthode de modélisation qui s'impose au vu des critères retenus. Plus exactement, le choix de la méthode doit être adapté aux objectifs recherchés et à la nature des données disponibles : selon que l'on dispose de séries d'observations ou d'observations isolées, qu'il y a une proportion importante ou faible d'observations sans dégradations, etc., on peut tenter de recourir à une méthode ou à une autre (*cf. ci-dessus*). Une autre voie envisageable (*cf. infra*) est d'appliquer systématiquement plusieurs méthodes selon une procédure rigoureuse et de comparer leurs résultats.

■ Mise en œuvre pratique des méthodes de modélisation

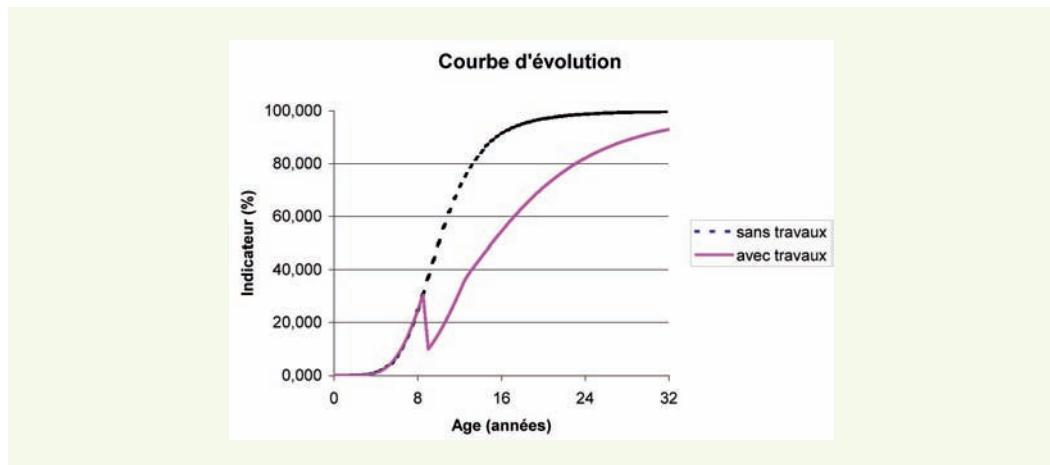
S'agissant de modéliser l'évolution des indicateurs d'état des chaussées, les considérations précédentes conduisent à préconiser la procédure suivante.

1. On identifie les lois d'évolution à partir des informations recueillies sur le réseau auquel on va les appliquer :
 - a. un examen préliminaire de la base s'impose pour s'assurer que les informations vérifient certains critères de qualité (variation monotone pour certaines, respect de plages plausibles pour d'autres, etc.) ;
 - b. on répartit ensuite les informations de la base de gestion entre deux catégories : les indicateurs dont il faut modéliser l'évolution et les variables susceptibles d'expliquer ces évolutions (variables explicatives potentielles) ;

- c. à ce stade, il est souhaitable que des experts examinent la liste de variables explicatives avec deux objectifs : éviter de retenir des variables trop corrélées entre elles, qui pourraient biaiser la recherche des véritables variables explicatives ; écarter avec prudence les variables qui ne sont notoirement pas explicatives (pour ne pas affaiblir l'analyse) ;
- d. on applique la ou les méthodes d'analyse statistique les plus appropriées compte tenu de la structure et du contenu de la base ;
- e. les experts examinent finalement les lois obtenues – éventuellement par plusieurs méthodes appliquées en parallèle – et valident ou infirment les choix de variables explicatives, pouvant alors renvoyer la démarche au pas (d).
2. On fixe les paramètres des lois d'effet des travaux sur chacun des indicateurs :
 - a. la loi d'effet d'une tâche d'entretien sur un indicateur est définie par une série de paramètres décrivant l'effet instantané de l'entretien puis la forme de la courbe d'évolution telle que modifiée par les travaux (**figure 2**) ;
 - b. ces valeurs, qui peuvent elles aussi dépendre de variables explicatives comme l'épaisseur de la couche mise en œuvre dans le cadre de l'entretien, sont, en l'état actuel des connaissances, remplies à dire d'expert ; des travaux de recherche ont toutefois été conduits qui permettent d'espérer une méthode plus systématique que l'expert devra néanmoins continuer à guider.

figure 2
Exemple d'effet de travaux entraînant :

- une réinitialisation de l'indicateur à une valeur de 10 %,
- une augmentation de 150 % de sa robustesse.



3. On applique les lois d'évolution et les lois d'effet des travaux :
 - a. chaque année, après que le projet de programme d'entretien a été établi, les indicateurs d'état sont actualisés en appliquant leur loi d'évolution s'il n'y a pas eu de travaux (tâche « Rien ») et en appliquant la loi d'effet des travaux dans le cas contraire ;
 - b. le cas échéant, la loi d'évolution est ajustée sur la section, en utilisant les observations qui y ont été faites auparavant pour définir sa robustesse. Celle-ci demeure inchangée tant que de nouveaux travaux n'ont pas été effectués. Elle est spécifique à chaque section et chaque indicateur.

Cette dernière étape permet d'obtenir l'état de la chaussée au début de l'année suivante, comme l'indique la **figure 1**.

DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES D'ANALYSE ÉCONOMIQUE

■ Cadre d'analyse économique

L'analyse technico-économique de l'entretien des routes se fonde sur un constat : l'entretien induit des coûts, mais il génère des avantages. Plus on entretient un réseau, plus les coûts d'entretien s'élèvent et plus les coûts d'usage baissent, et inversement. La valeur cumulée de ces coûts (usage + entretien) s'élève si l'on entretient insuffisamment le réseau du fait de la montée des coûts d'usage), mais aussi si on l'entretient trop (du fait de la montée des coûts de travaux). On pressent dès lors

qu'il existe, pour un réseau donné dans un état donné, une pratique d'entretien optimale d'un point de vue économique (**figure 3**). Le but premier de l'analyse technico-économique est d'identifier cet optimum [11-13].

Concrètement, ce type d'analyse s'enchaîne assez naturellement après la simulation de l'application d'une politique d'entretien sur une certaine période, telle que décrit dans les paragraphes précédents et illustré par la **figure 2**. On dispose, en effet, dans le fichier « actions/coûts/bénéfices », de tous les éléments pour établir un chiffrage des dépenses et des bénéfices occasionnés, chaque année, par l'application des stratégies d'entretien, c'est-à-dire par la mise en œuvre d'une politique d'entretien.

Une actualisation de ces montants est réalisée, généralement à la date de l'étude (**figure 4**). Considérant l'état du réseau au début de la période d'analyse et son état à l'issue de cette période, on peut dresser un bilan prévisionnel de la politique d'entretien simulée. La répétition de cette démarche pour différentes politiques d'entretien permet de comparer celles-ci, et de rechercher celle qui présente le meilleur rapport avantages/coûts.

À noter que si, en théorie, une analyse d'optimisation se devrait d'intégrer toutes les considérations qui ont été évoquées et qui sont reprises dans la **figure 4**, la réalité reste, aujourd'hui, plus modeste. Les modèles technico-économiques concernant les coûts de fonctionnement des véhicules en Europe, et plus encore les coûts d'environnement, restent à affiner et à rendre opérationnels. Les systèmes actuels prennent donc essentiellement en compte, d'une part, le coût des travaux d'entretien augmenté des coûts de gestion associés (études, gestion du trafic sur chantier) et des surcoûts induits (temps perdus par les usagers) et, d'autre part, l'amélioration de l'état du réseau vu à travers les notes d'état de la chaussée.

figure 3

Principe de l'analyse technico-économique de l'entretien d'un réseau routier

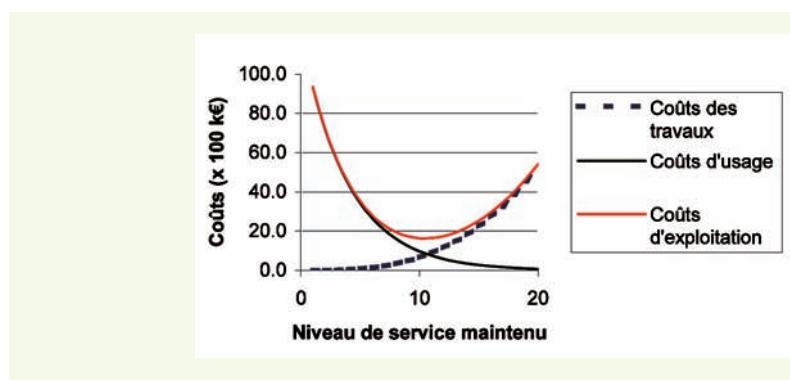
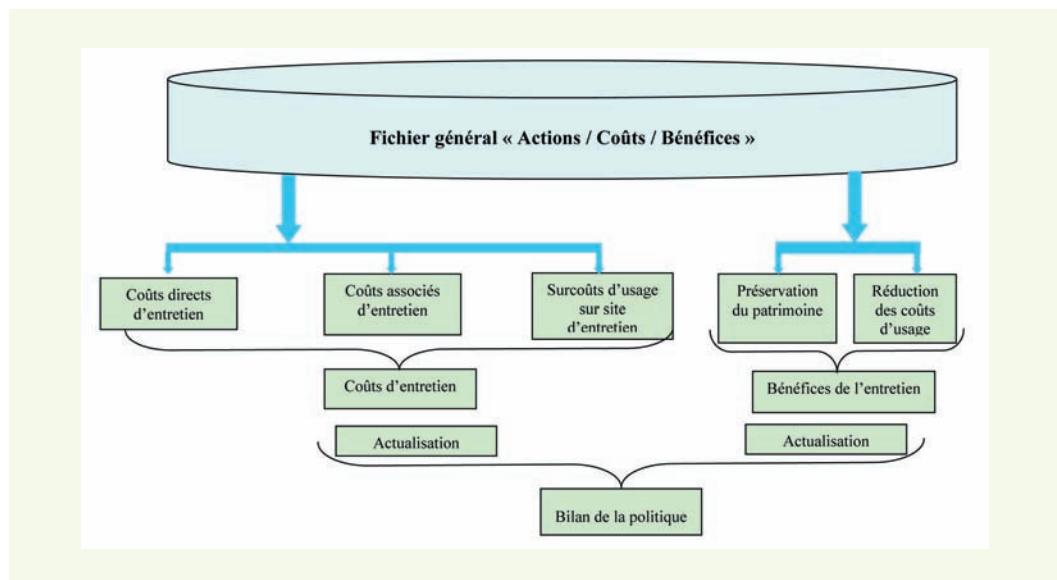


figure 4

Structure globale de l'outil d'analyse technico-économique de l'entretien routier (d'après [15]).



■ Actualisation des coûts et des bénéfices

Ainsi qu'on l'a mentionné, le choix d'une politique d'entretien justifie une analyse sur le long terme. Comparer des coûts et des avantages, c'est comparer des flux économiques qui se répartissent sur une longue période. Le poids relatif de deux mouvements n'est toutefois pas le même s'ils sont simultanés ou décalés dans le temps. La méthode d'actualisation la plus généralement employée consiste à appliquer une formule permettant de ramener tous les flux à une année donnée (dite année 0), qui peut être celle de construction de l'infrastructure ou celle à laquelle est faite l'analyse :

$$VA = C_0 + \sum_{t=0}^{t=n} \{F_{i,t}[CR_t + CE_t + CU_t]\} - F_{i,n}R_e \quad (4)$$

où

- VA = bilan global de l'exploitation (construction incluse) de l'infrastructure, actualisé à l'année 0 ;
- C_0 = coût de construction à l'année 0 (si inclus dans l'analyse) ;
- CR_t = coût de réhabilitation à l'année t ;
- CE_t = coût d'entretien à l'année t ;
- CU_t = coûts d'usage et coûts environnementaux à l'année t ;
- R_e = valeur résiduelle de l'infrastructure à la fin de la période d'analyse ;
- n = durée de la période d'analyse, généralement égale à ce que l'on considère comme étant le cycle de vie de la chaussée.

Le facteur d'actualisation, $F_{i,t}$, est calculé par la formule :

$$F_{i,t} = \frac{1}{(1+i)^t} \quad (5)$$

dans laquelle i est un « taux d'actualisation » qui reflète :

- soit le retour sur investissement vrai, lorsque l'on s'intéresse aux infrastructures gérées par le secteur privé ;
- soit une forme de « préférence temporelle » du maître d'ouvrage lorsque celui-ci est public.

De nombreuses études (voir, par exemple, [16-18]) ont montré que la valeur de ce taux peut avoir un impact majeur sur les conclusions des études de rentabilité, jusqu'à les inverser.

■ Modèles technico-économiques

➤ Préservation du patrimoine

Dans une démarche assez régulièrement adoptée – notamment, en France, pour le calcul des notes IQRN [2] –, on attribue à une chaussée une valeur égale à sa valeur à neuf diminuée du coût des travaux nécessaires pour sa remise à neuf. Ces travaux sont déterminés par un diagnostic sommaire fondé sur un croisement des indicateurs d'état des chaussées grâce à des tables construites par des experts. L'une des difficultés de cette méthode réside dans l'appréciation de l'état « réel » de la structure de chaussée. Celle-ci est encore essentiellement fondée sur le relevé visuel des dégradations de surface. De ce fait, si une chaussée très fissurée, qui devrait donc avoir une valeur résiduelle basse, a été recouverte par un simple enduit superficiel qui a fait disparaître très provisoirement les fissures, elle obtient une forte valeur résiduelle qui ne correspond pas à sa valeur réelle (effet dit « de cache-misère »).

Le projet FORMAT a proposé une démarche un peu plus évoluée [16]. Son principe consiste à donner une valeur résiduelle à chacune des couches de chaussées en fonction de son état d'endommagement, selon la méthode indiquée au premier paragraphe ci-dessus, et à sommer ces valeurs résiduelles sur l'ensemble des couches. Cette démarche, plus rigoureuse, est également plus théo-

rique et plus difficile à mettre en œuvre car on ne dispose pas aujourd’hui de méthodes de mesure directe de l’état d’endommagement des couches enfouies.

Le LCPC développe un module de monétarisation de l’état des chaussées qui applique une autre idée. Il s’agit de considérer que l’état d’une chaussée à un instant donné est traduit, non seulement par les valeurs de ses indicateurs de surface à cet instant, mais aussi par la vitesse d’évolution de ceux-ci, observée ou évaluée par les lois. Concrètement, on pondère la note Patrimoine (respectivement de surface) par la robustesse des indicateurs de structure (respectivement de surface) de la chaussée. La valeur résiduelle de la chaussée se calcule alors par la formule :

$$V_r = V_{\text{neuf}} * \frac{N_p}{20} * (2 * R) \quad (6)$$

V_{neuf} est la valeur à neuf de la chaussée (hors coût de l’emprise et des équipements), que l’on a conventionnellement fixée par type de chaussée et par trafic de dimensionnement (**tableau 3**), en s’inspirant des valeurs de reconstruction fixées dans la méthode IQRN et en faisant l’hypothèse que leur robustesse correspond au modèle moyen ($R = 0,5$).

tableau 3

Valeur conventionnelle à neuf des chaussées selon leur type et leur trafic (estimée en 2000), pour une robustesse moyenne
- MX : Assise mixte, fondation hydraulique et couche de base bitumineuse.

Valeur neuve par type de chaussée et de trafic (€/m ²)				
	NT (€/m ²)	GB (€/m ²)	GH (€/m ²)	MX (€/m ²)
T0	18,9	16,1	18,9	17,5
T1	16,1	13,2	16,1	14,6
T2-T3	13,2	12, ³	13,2	12,8

La robustesse prise en compte dans la formule (6) résulte de la moyenne des robustesses de la section vis-à-vis des différents indicateurs pris en compte dans le calcul de la note.

Exemple : Considérons une chaussée en grave-bitume (GB), avec un trafic T1. Cette chaussée est caractérisée par les valeurs d’indicateur d’état et de robustesse données dans le **tableau 4**.

tableau 4

État d’une section en GB avec un trafic T1.

Indicateurs	Valeurs %	Robustesses vis-à-vis de ces indicateurs
Déformations significatives	10	0,47
Déformations graves	2	0,68
Autres fissures significatives	16	0,42
Autres fissures graves	5	0,52
Réparations localisées	0	0,5
Réparations graves	0	0,5

La valeur à neuf de la chaussée serait de 13,2 €. La notation donnée par IQRN pour cette section est $N_p = 11$. La moyenne des robustesses vaut $R = 0,515$. La valeur résiduelle de la chaussée, selon l’équation (6), est égale à :

$$V_r = 13,2 * \frac{11}{20} * (2 * 0,515) = 7,47 \text{ Euros / m}^2 \quad (7)$$

› Surcoûts d’usage engendrés par les chantiers d’entretien

Si l’on veut apprécier, de façon complète et équitable, les coûts générés par les chantiers d’entretien, il convient de ne pas oublier ceux que supporte l’usager. En particulier, l’exécution d’un chantier implique souvent la neutralisation totale ou partielle de la route, disposition qui perturbe le

trafic et se traduit parfois pour l'usager par un allongement temporaire de son temps de trajet. Un modèle a été développé [19], qui donne, pour tout instant d'une journée, la probabilité que le flot de trafic atteigne – voire dépasse – la capacité résiduelle de la route en chantier. Dès que cette capacité résiduelle est dépassée, les véhicules en excès doivent attendre (s'il ne s'offre à eux aucune autre option) et il se forme un ralentissement dont la longueur peut être évaluée.

Le trafic journalier est modélisé comme la somme d'un terme déterministe et d'un terme probabiliste :

- le terme déterministe est lui-même la somme de trois fonctions en cloche – c'est-à-dire les fonctions de densité de probabilité selon la loi normale – qui traduisent les trois pics usuels de circulation (matin, midi, soir) ;
- le terme probabiliste compte deux coefficients moyennant la double hypothèse qu'il suit une loi normale – sauf si cela conduit à une valeur négative, auquel cas la prédition est fixée à zéro – et que son écart type est constant.

L'équation donnant la répartition journalière du trafic s'écrit donc :

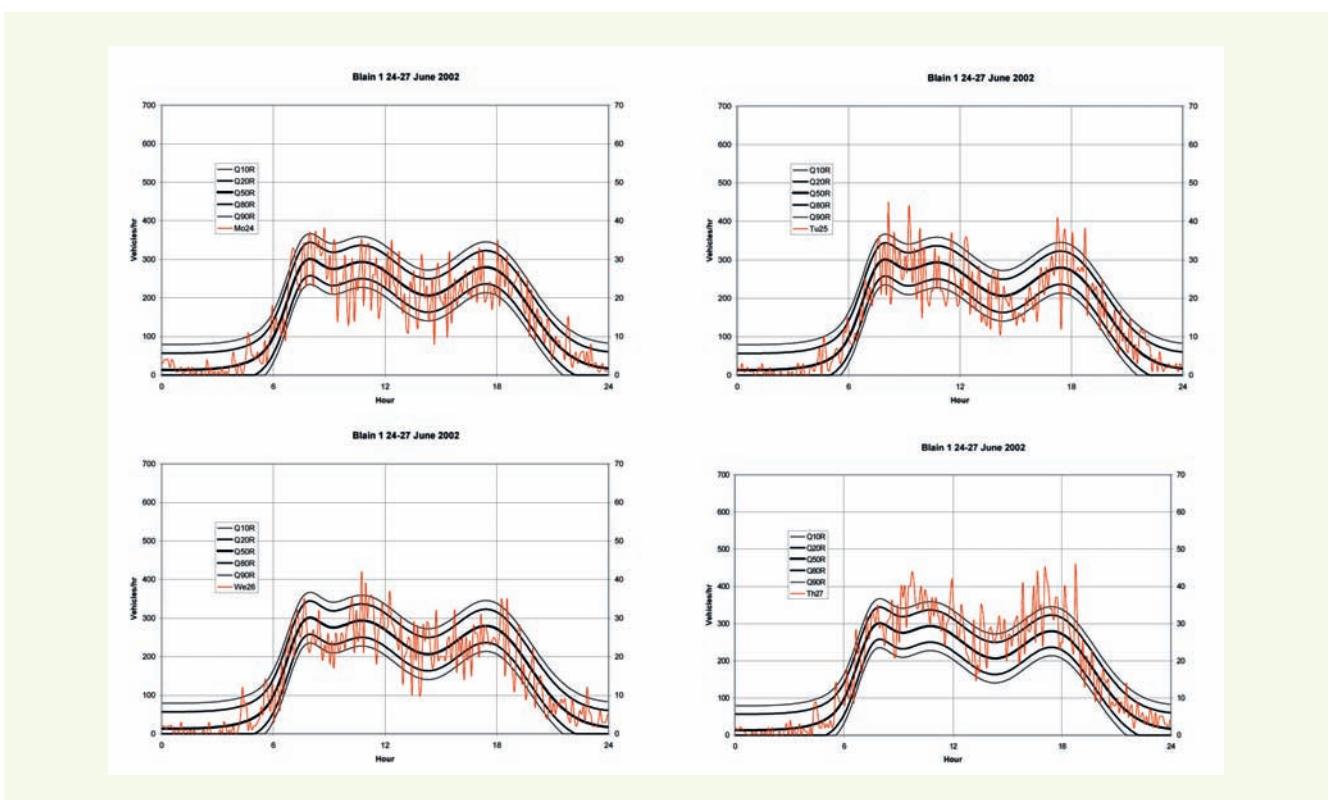
$$T(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{i=3} \frac{a_i}{\sqrt{2\pi}s_i} \exp(-(t-m_i)^2 / 2s_i^2) + \varepsilon_i \quad (8)$$

où

- T est la valeur prédite du flot de trafic ;
- t est le temps, exprimé en heures décimales à partir de zéro heure pour le jour considéré (pour les comptages réels, c'est le centre de la tranche) ;
- a_0 est la valeur minimale du trafic, généralement observée en milieu de nuit ;
- a_i représente l'amplitude de la pointe de trafic $n^{\circ} i$ (nombre de véhicules) ;
- m_i correspond à la moyenne (valeur de t à laquelle se produit la pointe $n^{\circ} i$) ;
- s_i un écart type, qui traduit l'étalement de la pointe de trafic $n^{\circ} i$;
- ε_i est le résidu, qui suit une loi normale.

figure 5
Données d'une station SIREDO et modélisation (d'après Brillet [19]).

La **figure 5** illustre ce type de modèle en le comparant avec des données réelles acquises par une station de comptage SIREDO (système informatisé de recueil de données de circulation).



Ce modèle n'est exploitable pour une **analyse au niveau d'un réseau** que si le jeu de coefficients qui le paramètre est suffisamment restreint pour pouvoir figurer dans une base de données routières. Différentes études [19] ont permis de réduire le jeu de paramètres du modèle au prix d'hypothèses qui ont été évaluées. *In fine*, le modèle est paramétrable par cinq coefficients :

- le type de route (autoroute, voie express ou route nationale),
- le type de la région (région continentale, région côtière),
- le sens de la voie (entrée en ville, sortie de ville, indifférent),
- le trafic moyen journalier sur l'année (TMJA),
- enfin, le pourcentage de poids lourds dans ce trafic.

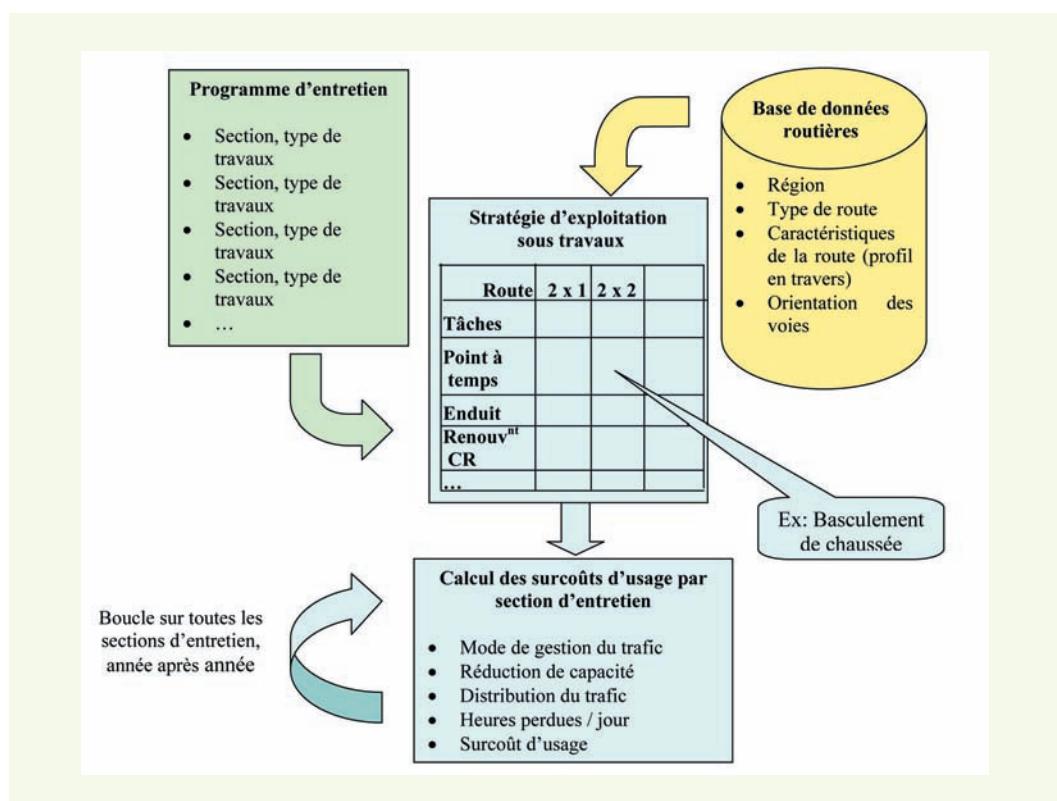
Ces deux derniers coefficients figurent usuellement dans les bases de données routières ; il convient de rajouter, de façon assez simple, les trois précédents. Par ailleurs, on définit une « stratégie de gestion du trafic sous travaux » en indiquant, pour chaque tâche d'entretien et chaque catégorie de voies (1×2 voies, 2×2 voies, etc.) le mode de gestion du trafic selon, éventuellement, le type de jour travaillé dans la semaine (lundi au jeudi, vendredi, samedi et veille de jour férié, dimanche et jour férié). La **figure 6** précise cette démarche.

L'évolution de la longueur des bouchons éventuels est estimée par un algorithme dont le principe est très simple [19] : connaissant la probabilité p que le trafic T soit supérieur à une valeur donné à l'instant t , on peut déduire le nombre de véhicules présents dans la queue qui se forme lorsque T dépasse C , la capacité de la route, qui elle-même peut être une variable aléatoire. On découpe la durée d'analyse en périodes très courtes de l'ordre de quelques minutes. On considère que :

- si, au cours de la période précédente, il n'y a pas eu de queue et si la capacité n'a pas été dépassée, alors la longueur de queue reste nulle ;
- dans les autres cas, la différence entre Q et C s'ajoute algébriquement au nombre de véhicules présents dans la queue. Si le résultat est négatif, la queue se résorbe jusqu'à disparaître [16].

figure 6

Évaluation du surcoût total d'usage associé à l'application d'une politique d'entretien (CR : couche de roulement).



SYSTÈMES D'AIDE À LA GESTION DE SECONDE GÉNÉRATION

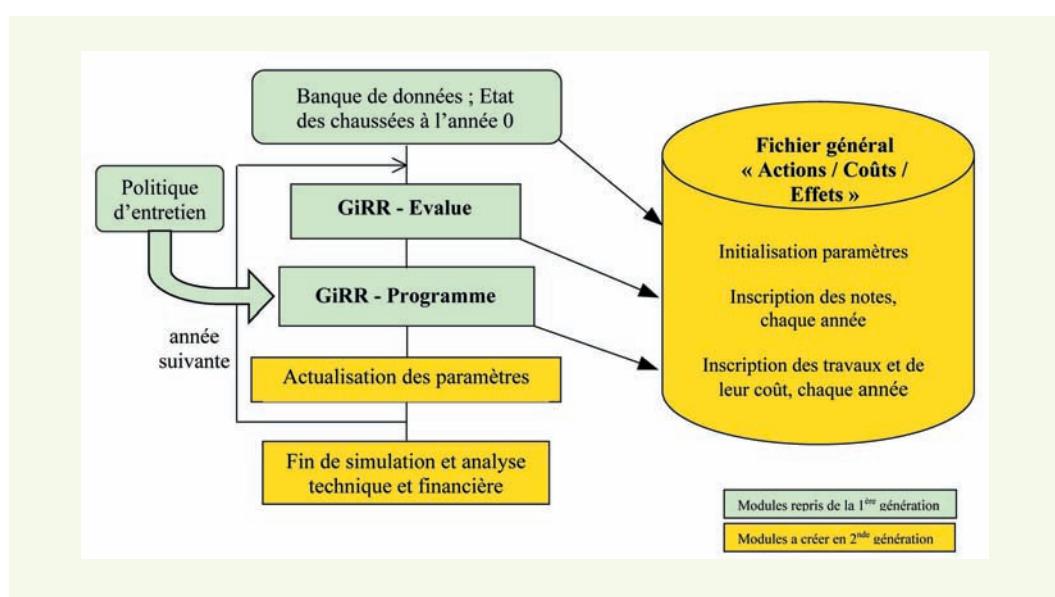
En se fondant sur l'ensemble des résultats exposés dans les paragraphes précédents, le LCPC a développé un système d'aide à la gestion de l'entretien des routes, dit « de seconde génération » : **Programme-Plus**. Ce système répond très précisément à la structure de la [figure 1](#), en exploitant les modules de la première génération GiRR-Évalue et GiRR-Programme. Il intègre en partie les conclusions des études conduites sur les lois d'évolution des dégradations de chaussée et sur les lois d'effet des travaux. Cette version a été diffusée à partir de mars 2005. D'autres versions sont en préparation pour intégrer les modèles d'analyse technico-économiques, dans une formulation qui restera, dans un premier temps, assez simple.

■ Structure du système Programme-Plus

La structure de Programme-Plus est présentée sur la [figure 7](#).

Cette figure est simplement obtenue en remplaçant, dans la **figure 1**, les modules d'évaluation et de programmation par, respectivement, GiRR-Évalue et GiRR-Programme, et en réduisant l'analyse finale à ses composantes techniques et financières

figure 7
*Structure de
Programme-Plus.*



■ Durée de la période de simulation et conséquence sur Programme-Plus

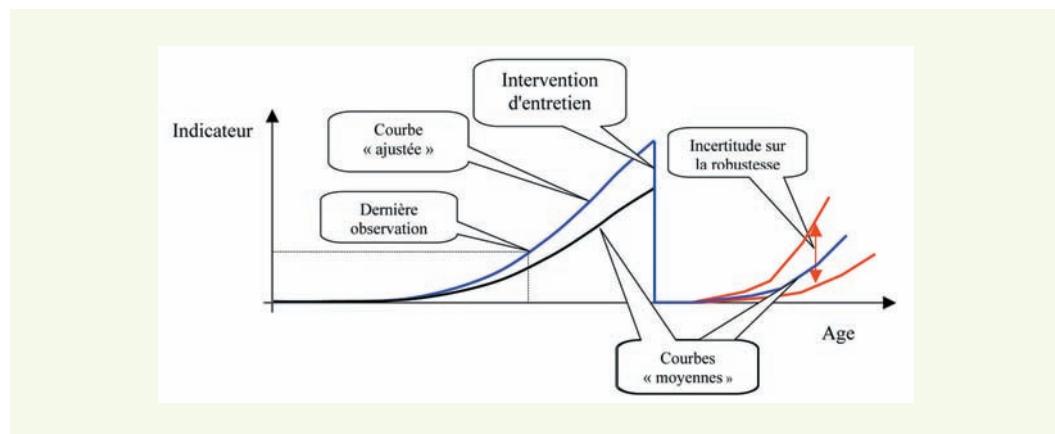
S'il n'y a, en théorie, aucune limite dans le temps à la simulation, il en va différemment en pratique. La prédiction de la valeur d'un indicateur d'état sur une section donnée devient de moins en moins fiable lorsque l'on s'éloigne de la date de sa dernière observation réelle sur le site. Rappelons que chaque indicateur évolue en suivant une loi dont l'équation s'écrit :

$$V(t) = F(t, \alpha_1, \alpha_2, C_1, C_2, R) \quad (3)$$

où les coefficients α_i ont été déterminés par le processus de modélisation, les variables explicatives explicites C_i proviennent de la base de données et la robustesse R est calculée à partir de la ou des dernières observations de l'indicateur $V(t)$ connues sur la section.

Comme cela a été indiqué plus haut, la robustesse R permet de prendre en compte toutes les variables explicatives implicites, c'est-à-dire qui influencent de fait l'évolution de $V(t)$ mais ne peuvent pas figurer dans la loi car elles ne sont pas connues dans la base de données. On a montré qu'elle contribuait significativement à la fiabilité du modèle. Cette robustesse reste vraie aussi longtemps qu'il n'a pas été réalisé d'entretien sur la section après la dernière observation réelle disponible (**figure 8**). Dès lors que des travaux sont effectués sur la section et qu'aucune observation réelle postérieure n'est disponible, la robustesse « exacte » n'est plus connue et on se doit de considérer

figure 8
Précision des prédictions
après une observation
réelle et après des travaux.



une robustesse théorique (éventuellement la valeur moyenne : 0,5). Les prévisions d'évolution des dégradations, donc des notes et des travaux, restent vraies en valeur globale (au niveau du réseau) – puisque les lois moyennes sont établies à ce niveau –, mais peuvent être sensiblement biaisées si elles sont appliquées au niveau d'une section particulière.

Ceci conduit à penser que les prévisions de notes et de travaux sont exploitables, donc présentables, au niveau d'une section aussi longtemps que l'on dispose dans la base de départ d'une observation réelle sur cette section, sans travaux postérieurs. Au-delà, les prévisions ne sont exploitables, donc présentables, qu'en valeur globale. Concrètement, on a choisi dans Programme-Plus de présenter les prévisions de programmation et d'évolution des notes par section pendant les six premières années de la simulation. Ainsi, on augmente les chances que :

- les travaux soient programmés sur des sections déjà dégradées à la date de début de simulation (sans cela, ils surviendraient plus tard) et sur lesquelles des observations de ces dégradations sont disponibles dans la base pour calculer la robustesse ;
- les sections qui feront l'objet d'une proposition de travaux d'entretien au titre de la programmation durant ces six ans ne feront vraisemblablement pas l'objet d'une seconde proposition indépendante pendant la même période. Une imprécision sur leur comportement après entretien aura donc moins de conséquence.

Au-delà de cette période, on ne présente que les résultats agrégés au niveau du réseau (budgets d'entretien, notes globales) qui, seuls, sont porteurs d'informations, avec les précautions qu'imposent les incertitudes inhérentes à toute prévision à long terme.

■ Analyses technico-financières

Différentes analyses peuvent être effectuées lorsque la simulation est achevée, à partir des résultats qui ont été accumulés dans le fichier général « actions/coûts/effets ».

> Analyse sur le moyen terme

On qualifie de moyen terme la période initiale de 6 ans. Durant ces années, Programme-Plus réalise la programmation des travaux en localisant et en mettant en priorité les interventions. Les programmes d'entretien pour cette période sont donc accessibles et peuvent être examinés aussi bien sous la forme d'une liste de travaux localisés que sur des schémas d'itinéraire (**figure 9**), voire sur des cartes (en repassant par la base de données et ses outils de cartographie).

Ils peuvent également être présentés sous la forme de budgets annuels globaux ou éclatés par type de techniques, par itinéraire, par type de sections, etc. De la même façon, l'évolution de l'état des chaussées peut être suivie sur cette période, aussi bien au niveau global du réseau ou d'une partie de celui-ci qu'au niveau de chaque section.

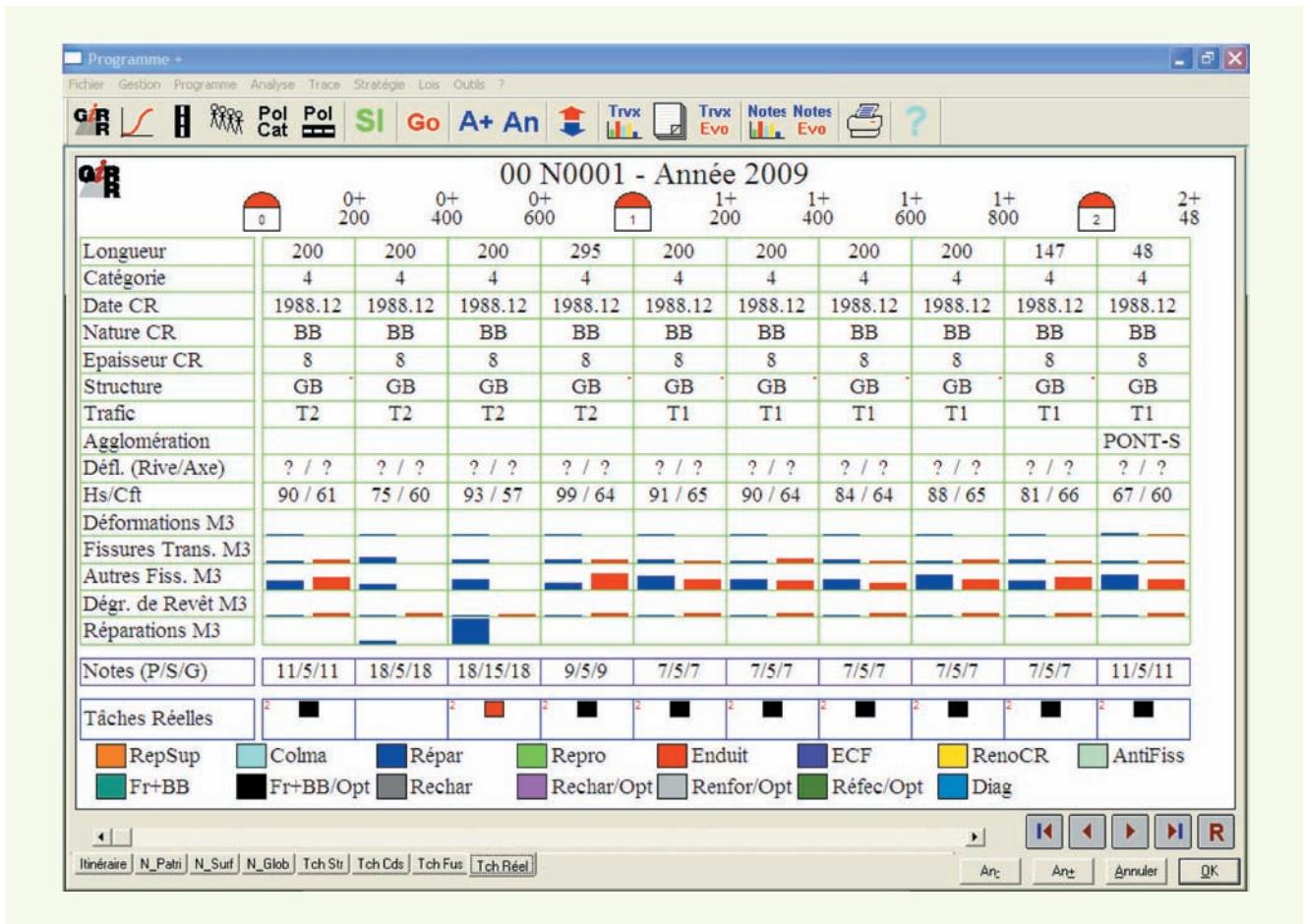


figure 9

Présentation de l'état d'une route et des travaux proposés sur un schéma d'itinéraire.

La méthode employée permet aussi d'actualiser la programmation. Notons N l'année de simulation. Supposons que cette simulation « initiale » ait conduit à des programmes de travaux notés $\{P_{N, N+1}\}$, i valant 1 à 6. Pendant l'année $N + 1$, le programme réellement exécuté sans doute de $\{P_{N, N+1}\}$, notamment pour des raisons d'opportunité. Si les travaux réellement exécutés durant cette année $N + 1$ sont ensuite inscrits dans la base de données, une nouvelle exécution du logiciel les prendra automatiquement en compte, ce qui lui permettra d'adapter les programmes d'entretien $\{P_{N, N+2} \text{ à } P_{N, N+6}\}$: les travaux prévus mais non exécutés en $N + 1$ seront reprogrammés et, à l'inverse, ceux réalisés alors qu'ils n'étaient pas programmés seront supprimés des programmes suivants.

> Analyse sur le long terme

Le long terme couvre la période commençant lors de la septième année de simulation et allant jusqu'à la fin de celle-ci. Sur cette période – incluant, bien sûr, celle qui précède –, l'utilisateur n'a accès qu'à des résultats globaux sur l'état du réseau (par exemple, l'évolution des notes de structure et de surface) et sur les budgets d'entretien (montant par catégorie de dépense), résultats qui traduisent d'une part l'effet technique des stratégies simulées, et d'autre part les moyens financiers à mettre en œuvre pour appliquer ces stratégies. La **figure 10** illustre ces résultats sur un réseau de 250 km de route, pour deux stratégies, l'une consistant à ne rien faire, l'autre à exécuter les travaux nécessaires pour maintenir sur 12 ans le niveau structurel des chaussées.

Ces graphiques montrent, sur un cas d'école, comment le système d'aide à la gestion peut être utilisé pour comparer différentes stratégies d'entretien et faire des choix en considérant le moyen terme. Dans la configuration actuelle de Programme-Plus, les stratégies ne sont comparées qu'en termes de coût direct des travaux et d'effet sur les notes d'état. Les modules en cours d'étude sur la préservation du patrimoine et les coûts d'usage induits par les travaux devraient permettre d'étendre et de compléter cette comparaison. À plus long terme, il devrait être possible de prendre en compte l'impact de l'entretien sur l'usage des routes, et notamment sur la sécurité et le confort des usagers.

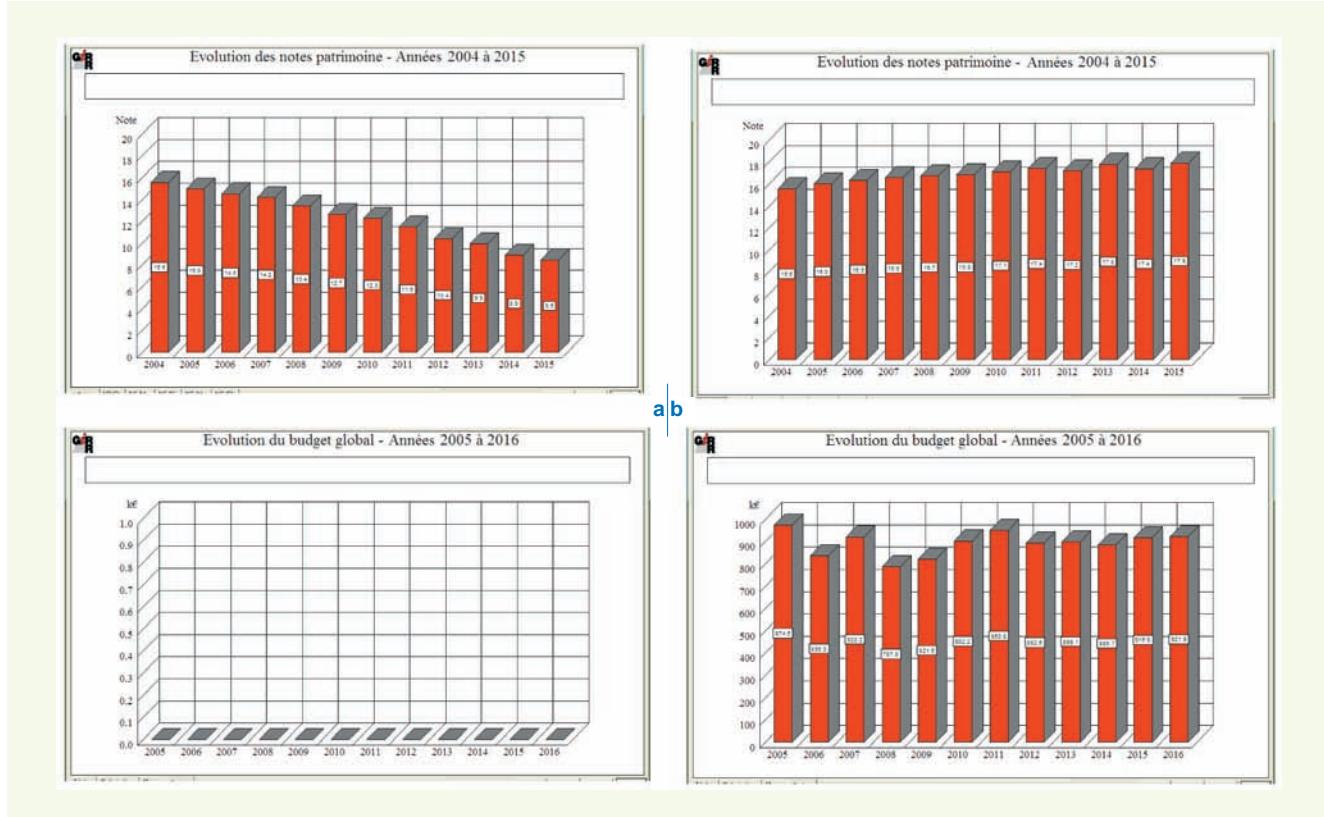


figure 10

Évolution de l'état d'un réseau pour deux stratégies d'entretien.
a) Aucun entretien sur 12 ans (budget nul).
b) Stratégie de maintien structurel (~ 1 000 k€ par an).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le choix entre différentes stratégies d'entretien restera toujours une décision éminemment politique, que le système d'aide à la gestion pourra éclairer mais ne pourra jamais automatiser.

L'intérêt spécifique de l'approche qui a été suivie au LCPC, et qui est présentée ici, tient à ce qu'elle rétablit une cohérence complète entre l'analyse de stratégies d'entretien et la programmation des travaux : cette dernière résulte directement de l'application des stratégies qui ont été retenues à la suite de l'analyse à moyen terme, dans la forme sous laquelle elles ont été sélectionnées et selon les mêmes principes. Cette cohérence est une originalité du système qui lui donne une précision et une crédibilité qui ne se retrouvent pas dans les systèmes exploitant deux méthodes différentes, l'une pour analyser les stratégies et l'autre pour les traduire en programme d'entretien, surtout si les stratégies n'y sont pas définies de la même façon.

■ Modélisation de l'évolution des chaussées

Au début des années 2000, les connaissances sur l'évolution des propriétés des structures de chaussée ont beaucoup progressé grâce à la coopération du LCPC et du MTQ. On dispose de méthodes de modélisation très améliorées pour les indicateurs dont le niveau d'origine est connu (fissuration, arrachements, etc., tous nuls à la construction). Il reste à adapter ces méthodes aux indicateurs dont la valeur initiale dépend des matériaux et de leur mise en œuvre (adhérence, portance, etc.). Nous ne sommes pas entièrement désarmés devant cette question. Il est toujours possible d'adapter une loi générale à partir d'une seule valeur mesurée sur chaque section. L'expérience enseigne toutefois la prudence et, en même temps, apporte les outils d'analyse nécessaires pour affiner nos connaissances sur l'évolution des indicateurs dont la valeur initiale dépend notamment de la nature et de la mise en œuvre.

■ Modèles d'analyse économique

Dans ce domaine, les travaux menés de 2001 à 2004 dans le cadre des projets européens COST 343 et FORMAT ont montré que l'identification et la quantification des avantages constituaient un enjeu

essentiel pour les années à venir, car le rapprochement des coûts et des avantages résultant d'une activité est l'essence même de son optimisation. Cela suppose qu'on poursuive le développement de modèles économiques qui permettent, *in fine*, de chiffrer les réductions des coûts de transports routiers consécutifs à l'application de telle ou telle stratégie d'entretien. Dans nos pays industrialisés, les modèles directement exploitables concernent :

- la réduction des risques liés aux déplacements,
- la réduction des nuisances (bruit, pollution de l'air, effet de serre, prélevement de ressources naturelles, etc.),
- la durabilité des investissements.

Un travail important est également à faire pour préciser, dans le contexte européen, la relation entre les coûts de fonctionnement des véhicules (consommation, entretien, etc.) et l'état des infrastructures routières. Cette relation est un point de passage obligé pour la justification des budgets d'entretien des réseaux routiers.

■ Vers un concept plus évolué que Programme-Plus

La structure même de Programme-Plus est très conditionnée par les choix faits pour construire les modules de première génération. En particulier, les stratégies sont définies sous la forme de tables d'expertises assez complexes, pas toujours faciles à manipuler par les experts eux-mêmes et moins encore par les gestionnaires. Des travaux sont en cours pour rénover profondément le cœur de ce système, et surtout le rendre beaucoup plus apte à une optimisation directe (c'est-à-dire qui ne suppose pas que l'on cherche par essais successifs la meilleure stratégie). Récemment, une démarche alternative de programmation pluriannuelle d'entretien et d'analyse de stratégie a été proposée [20]. Elle vise à dépasser les limitations diagnostiquées ci-dessus. Elle part de la définition des domaines d'application des travaux, connaissances plus traditionnelles et mieux maîtrisées par les experts, et d'informations plus synthétiques sur les objectifs de l'entretien, mieux comprises par les gestionnaires. Elle détermine, par un algorithme d'optimisation, les travaux à entreprendre et leur planification sur la période d'analyse.

Dès lors que cette méthode sera mise au point et validée, elle pourra être mise en œuvre pour constituer un nouveau système d'aide à l'entretien, SAGIR, plus exploitable et plus performant que celui qui existe aujourd'hui, et qui présente quand même, notons-le, l'intérêt considérable de permettre enfin une gestion prévisionnelle des infrastructures routières.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier François Brillet qui l'a épaulé et a beaucoup contribué aux différents sujets de l'opération de recherche à l'origine de cet article. Ses remerciements vont aussi à Diane Leroux et Yves Savard, du ministère des Transports du Québec, pour leur participation aux recherches sur les lois d'évolution des chaussées qui sont rapportées dans cet article. Tristan Lorino et Alain Riouall ont également contribué de façon déterminante à ces travaux. Il convient aussi de souligner le travail de Daniel Meignen, qui a développé, mis au point et fait évoluer le système de première génération GiRR, puis a réalisé le système de seconde génération Programme-Plus.

Ces travaux ont également bénéficié de collaborations établies avec le laboratoire d'études et de recherches en mécanique des structures (LERMES) de l'université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand (Professeurs A. Vergne et D. Boissier) et avec l'institut de mathématiques appliquées (IMA) de l'université catholique de l'Ouest, à Angers (Professeur J.-M. Marion).

Le projet de coopération entre le LCPC et le LC-MTQ a été encouragé et soutenu financièrement par la commission permanente France-Québec. Qu'elle trouve, dans ces quelques lignes, l'expression de notre gratitude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 *Preventive maintenance of the national road Network*, Technical Guide, Ministry of Transport (France), Paris, April **1979** (version originale en français).
- 2 LEPERT P., GUILLEMIN R., BERTRAND L., RENAULT D., An evaluation of the French national highway network based on surface damage surveys, *3rd International Conference on Managing Pavements*, San Antonio, USA, May 21-26, **1994**.
- 3 GIRR – Évalue – Guide Méthodologique, Rapport LCPC, **1998**.
- 4 GIRR – Programme – Guide Méthodologique, Rapport LCPC, **1998**.
- 5 LEPERT P., JOUBERT P., Recent developments in the PMS in France, *4th International Conference on Managing Pavement*, Durban, vol. 1, **1998**.
- 6 LEPERT P., *Rapport scientifique de clôture de l'opération Gestion technico – économique des infrastructures*, Rapport LCPC, décembre **2004**.
- 7 RÈCHE M., *Effet des travaux d'entretien sur les lois d'évolution des dégradations de chaussées*, Thèse de doctorat, université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 15 novembre **2004**.
- 8 LEPERT P., SAVARD Y., LEROUX D., RÈCHE M., Méthodes statistiques de prévision de l'évolution des chaussées, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **250-251**, 2004, pp. 13-31.
- 9 LEROUX D., LEPERT P., RÈCHE M., SAVARD Y., Pavement Performance Modeling : Comparison of Three Methods, *The Transport Research Board Meeting*, Washington, USA, 12-14 January **2004**.
- 10 LORINO T., LEPERT P., RIOUALL A., Application à la campagne IQRN des méthodes statistiques d'analyse de l'évolution des chaussées, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **261-262**, 2006, pp. 00.
- 11 HILDEBRAND G., LEPERT P., Development of models for the economic evaluation of pavement maintenance : the PAV-ECO project, *2nd European Research Conference*, Brussels, Belgium, June **1999**.
- 12 LEPERT P., BURROW I., LEBEN B., ANTUNES de LURDES M., TURTSCHY J.-C., Fully Optimised Road MAintenance, *Slovenian Road Congress*, Portozzo, Slovénie, octobre **2004**.
- 13 LEPERT P., BURROW I., ANTUNES de LURDES M., TURTSCHY J.-C., A European Project to Fully Optimise Road Maintenance, *2nd European Pavement and Asset Management Conference*, Berlin, Allemagne, mars **2004**.
- 14 Conception et dimensionnement des structures de chaussée – Guide technique, Guide LCPC–SETRA, Paris, décembre **1994**.
- 15 LEPERT P., Système d'aide à la gestion de seconde génération : Guide méthodologique du prototype Programme Plus, Rapport LCPC, octobre **2001**.
- 16 LEPERT P., BRILLET F., ZIMMERMAN M., SPOOF H., RAMDAS V., Basic model for financial evaluation of pavement deterioration and additional costs at road works, Rapport D3/D4 du projet FORMAT (WP4), janvier **2003**.
- 17 Reduction in Road Closures by Improved Pavement Maintenance Procedures, Rapport final COST 343, avril **2003**.
- 18 CRAWFORD C., Pavement Life Cycle Costing, *National Asphalt Pavement Association*, Langam, **1989**.
- 19 BRILLET F., Projet européen FORMAT : Quantification de la gêne causée par les chantiers, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **261-262**, 2006, pp. 00.
- 20 LEPERT P., Logiciel d'aide à la gestion SAGIR – Spécifications moteur, Vol. 2, Rapport LCPC, octobre **2004**.