

# **Application à la campagne IQRN des méthodes statistiques d'analyse de l'évolution des chaussées**

Tristan LORINO\*  
Philippe LEPERT  
Alain RIOUALL

*Laboratoire central des ponts et chaussées*

## **RÉSUMÉ**

Cette étude vise à identifier, au travers des données provenant des campagnes « Image qualité des routes nationales » (IQRN), les facteurs qui influent sur le comportement des chaussées. Cette identification nécessite de mener conjointement analyse statistique (tests de significativité) et « analyse métier ». Deux méthodes statistiques ont été mises en œuvre : une méthode de régression non linéaire et une méthode fondée sur l'analyse des données de survie. Appliquées aux chaussées souples et fissurées du réseau routier national (RRN), ces méthodes ont permis de mettre en évidence le rôle de facteurs de structure, de trafic et de climat sur l'évolution des chaussées. Ces méthodes ont aussi mis en évidence les imperfections des bases de données routières de type « gestion de réseau », ainsi que l'inadéquation de certaines méthodes statistiques à l'analyse des données étudiées.

## **Application of statistical methods for analyzing pavement evolution to the IQRN quality campaign**

## **ABSTRACT**

*This study seeks to identify, through the use of data stemming from “National Road Quality Image” (French acronym: IQRN) campaigns, the set of factors that influence road pavement behavior. This identification effort entails jointly conducting a statistical analysis (significance testing) and a “road operator” analysis.*

*Two statistical methods were implemented, one featuring nonlinear regression techniques and the other based on a pavement survival data analysis. Applied to both flexible and cracked pavements within France’s national road network, these methods have enabled highlighting the impact of structural, traffic and climatic factors on pavement evolution. Such methods have also underscored the imperfections inherent in “network management” type road databases, along with the inappropriateness of certain statistical methods for analyzing collected study data.*

\* AUTEUR À CONTACTER :

Tristan LORINO  
tristan.lorino@lpc.fr

## PRÉSENTATION

Thierry KRETZ

Directeur technique

*Laboratoire central des ponts et chaussées*

*L'optimisation de la gestion de l'entretien routier sur les moyen et long termes suppose une bonne connaissance des lois qui gouvernent l'évolution des dégradations de chaussées. De très nombreux essais de laboratoire ont été réalisés depuis des décennies sur les matériaux de chaussées et ont permis d'établir des modèles de comportement très élaborés, notamment vis-à-vis des phénomènes de fatigue mécanique (fissuration, déformations permanentes, etc.). Ces modèles ont, eux-mêmes, été intégrés dans des méthodes de dimensionnement qui, une fois évaluées sur des sections tests, ont été largement appliquées sur le réseau routier national (RRN) français. Cette approche est-elle suffisante pour prévoir le comportement des chaussées construites sur les différents réseaux routiers, qui subissent des sollicitations d'exploitation et d'environnement réelles extrêmement diverses ? Peut-on faire l'hypothèse que ces chaussées se comportent conformément aux modèles établis et se dispenser ainsi d'un lourd et difficile travail d'observation et d'analyse de leur comportement réel ?*

*Les auteurs, comme bien d'autres spécialistes dans le monde, répondent à cette question par la négative. Les modèles élaborés à partir d'expérimentations réalisées dans les conditions très maîtrisées d'un laboratoire, même s'ils sont validés par le suivi d'un nombre, forcément restreint, de sections tests, ne peuvent suffire à décrire avec fiabilité le comportement réel de toutes les sections d'un réseau, considérées individuellement. Des études ont montré que de très nombreuses variables affectaient ce comportement, qui ne pouvaient pas toutes être considérées dans les essais de laboratoire et donc dans les modèles qui en résultent. Par ailleurs, les méthodes de dimensionnement ne visent pas à maîtriser l'évolution des dégradations durant toute la vie de la chaussée, mais plutôt à ne pas dépasser certains seuils critiques. Ainsi, dans la méthode française, on cherche à maîtriser « ... la probabilité pour qu'apparaissent, au cours d'une certaine période, des désordres qui impliqueraient des travaux de renforcement assimilables à une reconstruction de la chaussée... ».*

*Les travaux de modélisation de l'évolution des dégradations de chaussées par analyse statistique d'observations systématiques faites en site (c'est-à-dire de bases de données) se heurtent à des difficultés : complexité de l'évolution réelle des chaussées, rareté de certaines informations portant justement sur les variables explicatives de cette évolution, incertitudes diverses qui affectent les observations de site ou leur localisation, plage de variation restreinte de certaines variables, etc. L'étude des bases de données relève d'une observation du monde réel avec tout ce que celui-ci comporte de complexe et d'imparfait. La puissance des outils statistiques ne permet pas toujours de surmonter complètement ces difficultés. Pour autant, la mise en œuvre de cette approche est incontournable : elle seule apporte un « retour d'informations » indispensable sur le comportement des chaussées, sous une forme exploitable pour la gestion prévisionnelle de l'entretien (les lois d'évolution des dégradations). À supposer que les chaussées d'un type donné, d'un dimensionnement donné, se comportent en moyenne comme le prévoient les méthodes de dimensionnement, une section particulière de ce type ne suit jamais exactement cette moyenne, qui reste virtuelle. Et la gestion rationnelle de l'entretien routier vise justement à adapter chaque technique, chaque séquence d'entretien, à la section précise à laquelle elle s'applique. Comme le souligne cet article, les deux démarches (connaissances mécaniques issues d'essais de laboratoire, étude statistique de bases de données) ne sont pas à opposer, tout au contraire : elles sont complémentaires et doivent être étroitement associées, les connaissances mécaniques devant guider l'analyse statistique. Celle-ci peut pointer des variables qui ne sont pas encore prises en compte dans les méthodes de dimensionnement et qui conditionnent néanmoins leur comportement.*

*L'étude du comportement réel des chaussées par l'analyse statistique des bases de données routières est une voie de progrès de la gestion des routes. Elle doit rester prudente et modeste, en raison des difficultés auxquelles elle se confronte. Elle doit constamment rechercher des améliorations, notamment dans la définition des méthodes et dans la qualité des bases de données (des moyens de recueil et de la gestion des données). Elle constitue un retour d'expérience indispensable.*

## INTRODUCTION

L'optimisation de la gestion de l'entretien routier, sur les moyen et long termes, nécessite de connaître les facteurs susceptibles d'influer sur le comportement des chaussées. Ces facteurs, qualifiés de « variables explicatives » lors de l'étape de modélisation, peuvent être liés à la structure des chaussées (épaisseurs des différentes couches), au trafic (de dimensionnement ou réel) ou encore aux conditions climatiques (hauteur des précipitations, températures extrêmes, indice de gel) [1]. Afin d'identifier plus sûrement ces facteurs, des modèles statistiques sont mis en place : issus d'études antérieures [2-5], ils permettent d'exprimer les dégradations observées sur des sections de route en fonction de l'âge de celles-ci et d'une ou de plusieurs variables explicatives. Cette étape de modélisation du comportement des chaussées repose donc sur l'observation de l'évolution d'un échantillon représentatif de sections et sur l'analyse statistique de ces observations.

Dans le cas présent, l'échantillon représentatif est issu de la base de données IQRN. Cette base, de type « gestion de réseau », rassemble les données de dégradation de surface relevées depuis 1993 sur les routes nationales françaises, ainsi que certaines de leurs caractéristiques, essentiellement en termes de structure et de trafic. Pour enrichir les modèles statistiques ultérieurs, des informations complémentaires, relatives aux conditions climatiques et recueillies auprès de Météo-France, ont été ajoutées à l'échantillon analysé.

Dans la présente étude, des méthodes d'analyse statistique sont appliquées à une sous-population de la base de données IQRN. Sous réserve de leur adéquation aux données, elles doivent permettre de mettre en évidence le rôle de plusieurs facteurs dans l'évolution de la fissuration des chaussées bitumineuses épaisses et souples. En dernier lieu, une « expertise métier » est menée dans le but de corroborer les résultats issus de l'analyse statistique. Cette expertise consiste en l'interprétation des résultats statistiques en fonction des connaissances disponibles dans le domaine routier.

## MÉTHODES STATISTIQUES

### ■ Présentation

Quatre méthodes de modélisation de l'évolution des chaussées ont été étudiées.

- ① **La méthode directe [6]** : il s'agit d'une méthode de régression non linéaire multiple.
- ② **La méthode indirecte (MI) [7]** : elle associe un procédé d'ajustement itératif et une régression multilinéaire.
- ③ **La méthode des classes [8]** : elle s'appuie sur la théorie des chaînes de Markov et de leurs propriétés de stationnarité.
- ④ **La méthode d'analyse des données de survie (MADS) [2, 9]** : elle s'appuie sur les propriétés paramétriques des modèles pour données de survie.

Ces méthodes supposent que les équations mathématiques régissant les lois d'évolution sont pré-définies. Dans le cas des trois premières méthodes, ces équations sont habituellement de type sigmoïde tandis que, dans le cas de la MADS, la loi d'évolution est ordinairement une loi de Weibull. Dans la présente étude, seules les méthodes MI et MADS ont été mises en œuvre. Leur principe est brièvement rappelé ci-dessous (on trouvera une description complète de cette méthodologie statistique dans [3]).

### ■ Méthode indirecte (MI)

#### ➤ Modélisation

Cette méthode consiste à modéliser un indicateur de dégradation, tout en respectant une hypothèse de régularité qui veut qu'une dégradation tende naturellement à croître au cours du temps. Il existe de nombreuses fonctions respectant cette hypothèse de régularité, parmi lesquelles les fonctions

linéaire, exponentielle, sigmoïde... C'est cette dernière qui est retenue ici pour le modèle d'évolution ; celui-ci s'écrit :

$$k_i(t) = \frac{t^{u_i}}{t_{mi}^{u_i} + t^{u_i}}, \quad (1)$$

où  $k_i(t)$  est un coefficient d'évolution, croissant de 0 à 1, associé à la  $i^e$  section,  $t_{mi}$  est l'âge auquel le coefficient d'évolution atteint la valeur 0,5 et  $u_i$  est un paramètre de forme de la courbe d'évolution.

Cette formulation permet de déterminer les coefficients  $t_{mi}$  et  $u_i$ , propres à la  $i^e$  section, grâce à une régression linéaire portant sur l'ensemble des observations faites sur cette section, et effectuée sous forme itérative. Deux ou trois itérations suffisent à obtenir une précision suffisante pour les valeurs des paramètres. On cherche ensuite à exprimer ces valeurs en fonction de  $n$  variables caractéristiques des sections de routes, au travers des expressions suivantes :

$$u = u_0 \prod_{j=1}^n V_j^{\alpha_j}, \quad (2)$$

$$t_m = t_{m0} \prod_{j=1}^n V_j^{\beta_j}, \quad (3)$$

où  $V_1, V_2, \dots, V_n$  sont les variables explicatives anticipées par l'« expertise métier ». Une transformation logarithmique des équations (2) et (3) permet de déterminer les coefficients  $\alpha_j$  et  $\beta_j$  par ajustement de régressions linéaires univariées (cas où  $n = 1$ ) ou multiples (cas où  $n > 1$ ).

### ➤ Mise en œuvre

Pour chacun des deux paramètres  $u$  et  $t_m$ , trois types de régressions linéaires sont effectués.

**❶** Le premier consiste en une régression linéaire univariée : les variables explicatives sont intégrées à tour de rôle dans le modèle de régression. Un test de significativité permet de déterminer si un coefficient  $\alpha_i$  est significativement différent de 0, c'est-à-dire si la variable explicative  $V_i$  associée à ce coefficient a un impact significatif sur le paramètre étudié. Plus précisément, ce qui est calculé est la probabilité critique  $P$ , qui mesure l'accord entre l'hypothèse testée ( $H_0 : \alpha_i = 0$ ) et le résultat obtenu : plus cette probabilité critique est proche de 0, plus forte est la contradiction entre  $H_0$  et le résultat obtenu. On considère habituellement que l'hypothèse nulle  $H_0$  doit être rejetée dès que  $P$  est inférieure à 5 %. La régression univariée, qui permet d'éviter la redondance d'information fournie par plusieurs variables explicatives (phénomène statistique de multicolinéarité), présente cependant l'inconvénient de ne tenir compte que d'une partie de l'information disponible et conduit, par conséquent, à des résultats peu satisfaisants.

**❷** Le deuxième type de régression linéaire consiste en une régression par triplets : les variables explicatives sont intégrées trois par trois dans le modèle de régression. Le triplet de variables explicatives retenu comme étant le plus explicatif l'est au terme d'une procédure de comparaison des vraisemblances de chacun des modèles. Cette procédure, qui intègre davantage d'information que la régression univariée, suppose que les variables explicatives ne soient pas fortement corrélées : pour éviter ce phénomène de multicolinéarité, le choix de ne retenir conjointement que trois variables explicatives semble constituer un compromis raisonnable.

**❸** Le troisième type de régression linéaire consiste en une régression multiple : toutes les variables explicatives non corrélées sont introduites dans le modèle, puis une méthode de sélection descendante est utilisée ; à chaque étape, la ou les variables explicatives non significatives sont retirées du modèle, et un test statistique permet de déterminer si le retrait de cette variable ou de ces variables améliore la qualité de l'ajustement.

Pour chacun de ces types de régression, le coefficient de détermination – qui quantifie le pourcentage de variabilité des paramètres expliquée par le modèle – est calculé. Outre son caractère informatif, ce coefficient permet également de comparer entre eux les différents modèles de régression.

Enfin, la bonne adéquation du modèle de régression linéaire aux données est jugée dans tous les cas par l'étude de l'hypothèse de normalité des résidus.

## ■ Méthode d'analyse des données de survie (MADS)

### ➤ Modélisation

Cette méthode suppose que l'âge  $T_\tau$  auquel une section atteint un seuil de dégradation  $\tau$  est une variable aléatoire suivant une loi de vecteur de paramètres  $\theta$ , de fonction de répartition  $F(t)$  et de densité de probabilité  $f(t) = F'(t)$ . L'objectif de cette méthode est d'identifier la loi de probabilité de  $T_\tau$  par l'estimation de ses paramètres. À cette fin, on calcule la probabilité de la réalisation de ce qui est observé sur chaque section : c'est la fonction de vraisemblance (FV), qui est notée  $L(\theta)$ .

Une particularité de l'analyse des données de survie est la présence d'une variable aléatoire appelée censure et traduisant la possible non-observation du phénomène étudié – en l'occurrence l'atteinte du seuil  $\tau$ . Il existe trois types de censure :

- une censure à gauche, si lors de la première observation faite sur la  $i^e$  section au temps  $t_{i1}$ , le seuil de dégradation  $\tau$  est déjà atteint : dans ce cas, la contribution de cette section à la FV est  $F(t_{i1})$  ;
- une censure à droite, si lors de la dernière observation faite sur la  $i^e$  section au temps  $t_{i2}$ , le seuil de dégradation  $\tau$  n'a pas été atteint : dans ce cas, la contribution à la FV est  $1 - F(t_{i2})$  ;
- une censure par intervalle, si l'atteinte du seuil  $\tau$  par la  $i^e$  section a eu lieu entre deux observations successives, réalisées aux temps  $t_{i1}$  et  $t_{i2}$  ( $t_{i1} < t_{i2}$ ) : dans ce cas, la contribution à la FV est  $F(t_{i2}) - F(t_{i1})$ .

En l'absence de censure, la contribution d'une section à la FV est  $f(t)$ . L'expression finale de la FV est alors le produit, pour chaque section, des quantités précédentes : si l'on dispose de  $N$  sections, on obtient finalement :

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^N F(t_i)^{\delta_{1i}} [1 - F(t_i)]^{\delta_{2i}} [F(t_{i1}) - F(t_{i2})]^{\delta_{3i}} f(t_i)^{\delta_{4i}}, \quad (4)$$

où les fonctions  $\delta_{ji}$ , pour  $j = 1, \dots, 4$ , sont les fonctions indicatrices des types d'événements observés, c'est-à-dire qu'elles valent 1 respectivement en cas de censure à gauche, censure à droite, censure par intervalle et absence de censure, et 0 sinon.

Une fois la FV obtenue, on cherche alors à calculer l'estimateur  $\hat{\theta}$  qui est la valeur de  $\theta$  pour laquelle cette FV est maximale. Cette analyse est répétée pour les seuils d'évolution  $\tau$  compris entre 0 % et 100 % par pas de 5 %.

L'hypothèse couramment faite est que la variable aléatoire  $T_\tau$  suit une loi de Weibull [10] : cette loi, qui dépend de deux paramètres, est très souple et permet de supposer que la dégradation d'une section ne peut que s'accentuer dans le temps. Si l'on note respectivement  $\gamma$  et  $\mu$  les paramètres de forme et d'échelle de la loi de Weibull,  $X$  le vecteur des variables explicatives et  $\beta$  le vecteur des coefficients associés aux variables explicatives, alors :

$$F(t) = 1 - \exp[-(\mu t)^\gamma \cdot \exp(\beta' X)] \quad (5)$$

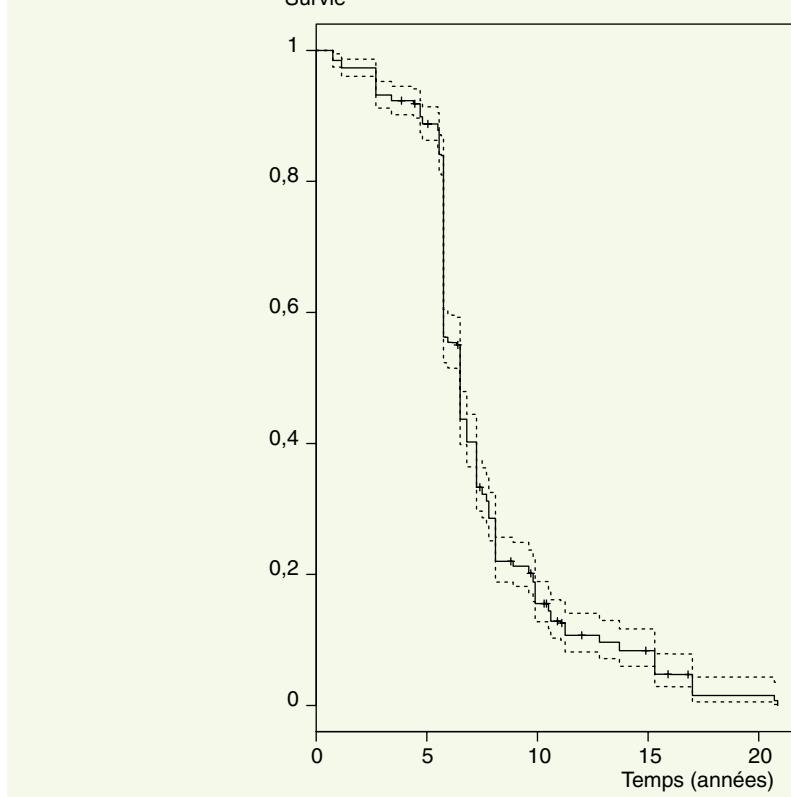
et

$$f(t) = \gamma \exp(\beta' X) \mu^\gamma t^{\gamma-1} \exp[-(\mu t)^\gamma \cdot \exp(\beta' X)]. \quad (6)$$

La fonction de survie, qui est définie comme la probabilité de rester en deçà d'un seuil de dégradation donné au cours du temps, est égale à  $1 - F(t)$ . Une illustration en est donnée par la [figure 1](#).

**figure 1**

Fonction de survie pour le seuil de 5 %, concernant l'étendue des fissurations relevées sur les routes nationales dans la zone du CETE Rhône-Alpes.



### ➤ Mise en œuvre

L'algorithme de Newton-Raphson permet de déterminer les valeurs  $\hat{\gamma}$ ,  $\hat{\mu}$  et  $\hat{\beta}$  qui maximisent la FV  $L(\theta) = L((\gamma, \mu, \beta))$ . Comme pour la méthode précédente, le choix des variables explicatives prises en compte dans l'analyse statistique repose sur « l'expertise métier ». La méthode de modélisation permet alors de confirmer ou d'infirmer le caractère explicatif de ces variables. À cette fin, un test de significativité permet de déterminer si un coefficient  $\beta_i$  est significativement différent de 0, c'est-à-dire si la variable explicative  $X_i$  associée à ce coefficient a un impact significatif sur le paramètre étudié.

Là encore, trois types d'approches – en fonction du nombre de variables explicatives incluses dans le modèle – sont retenues :

- une approche univariée, destinée à identifier individuellement les variables explicatives impliquées dans le processus de fissuration ;
- une approche par triplets de variables explicatives, qui permet d'enrichir l'information contenue dans le modèle tout en conservant une simplicité de calcul lors de la résolution du modèle ;
- une approche multiple, qui consiste à intégrer le maximum de variables explicatives non redondantes, puis à ne conserver que celles effectivement significatives, au terme d'un processus par sélection descendante.

La comparaison des différents modèles est effectuée grâce au critère d'Akaike [11], qui est défini par :

$$AIC(m) = 2 \left( \log[L(\hat{\theta})] - m \right) \quad (7)$$

où  $m$  est la dimension de  $\theta$ . Le meilleur modèle est celui qui maximise ce critère.

Enfin, une étude de l'ajustement des différents modèles aux données est réalisée, au travers de l'analyse des résidus martingales [12].

## LA CAMPAGNE IQRN

### ■ Généralités

L'opération « Image qualité des routes nationales » (IQRN), engagée par la Direction des routes en 1992, a pour objectif d'évaluer et d'assurer un suivi de l'état du réseau routier national : elle consiste à relever, par tiers chaque année, et suivant le mode opératoire M3 de la méthode LPC n° 38.2 [13], les dégradations de surface des quelques 30 000 km de routes nationales. Les moyens d'auscultation, qui associent des relevés visuels – pour les fissurations, les dégradations de revêtement et les réparations – et des mesures physiques par des appareils qualifiés – pour les déformations du profil en travers et l'adhérence – sont exécutées et gérées par les centres d'études techniques de l'Équipement (CETE). Ils alimentent une base de données qui comprend aujourd'hui 150 000 sections de routes de 200 m chacune, sections sur chacune desquelles on dispose d'au moins trois relevés consécutifs, conformément au **tableau 1**. Par ailleurs, et comme cela a été mentionné en introduction, la base comporte également des informations sur les structures de chaussées et le trafic lourd (TMJA).

**tableau 1**

Dates des relevés effectués par tiers sur le réseau routier national.

	Années de relevé		
	Relevé n° 1	Relevé n° 2	Relevé n° 3
1 <sup>er</sup> tiers du RRN	1995	1998	2001
2 <sup>e</sup> tiers du RRN	1996	1999	2002
3 <sup>e</sup> tiers du RRN	1997	2000	2003

Il est important de noter que le mode M3 ne distingue que deux types de fissuration : la fissuration transversale (de retrait) et les « autres fissurations ». Chaque type est lui-même réparti en deux catégories : les fissurations significatives et les fissurations graves, selon leur stade d'évolution. L'indicateur sur lequel repose la présente étude concerne l'étendue totale (significative et grave) des « autres fissurations ». Il est calculé pour chaque section et exprimé en pourcentage. Cet indicateur représente le rapport de la longueur de chaussée fissurée sur la longueur totale de la section, et regroupe :

- la fissuration de fatigue, due à la répétition des efforts de traction par flexion au passage des charges, et apparaissant dans les bandes de roulement ;
- la fissuration de la couche de roulement liée à une mauvaise exécution des joints de construction, au vieillissement du liant ou à une sensibilité du bitume aux contraintes thermiques.

On conçoit que ces deux types de fissuration apparaissent et se propagent plus ou moins rapidement selon différents facteurs, tout d'abord les caractéristiques de conception des chaussées (structure, dimensionnement, caractéristiques du bitume), ensuite le niveau de contraintes induit dans la chaussée au passage des poids lourds de charge utile supérieure à cinq tonnes (trafic), et enfin les conditions climatiques en ce qui concerne la fissuration thermique. Suite à cette « expertise métier » préalable, quatorze variables potentiellement explicatives – modélisant les facteurs ont été retenues pour l'analyse statistique (**tableau 2**).

### ■ Échantillonnage

L'étude, qui s'intéresse aux chaussées à assises bitumineuses et non traitées, a nécessité la constitution de différents échantillons, en fonction :

- de leur origine géographique ;
- de l'entretien qu'elles avaient – ou non – reçu ;
- des variables explicatives potentielles effectivement disponibles ;
- du nombre de relevés successifs disponibles sur chaque section.

**tableau 2**  
*Variables explicatives potentielles retenues pour l'analyse statistique d'après une première « analyse métier ».*

Catégorie	Identifier	Description*
Variables de structure	EpBB	Épaisseur de la couche de roulement (avant entretien éventuel)
	EpCB <sup>a</sup>	Épaisseur de l'assise
	EpCr <sup>b</sup>	Épaisseur de la dernière couche de roulement mise en place
	EpCNT <sup>a</sup>	Épaisseur du sol support
	EpEq <sup>a</sup>	Épaisseur équivalente (calculée selon la méthode d'Odemark [14])
	Epst <sup>a</sup>	Déformation tangentielle (ALIZÉ-LCPC [1, 15])
Variables de trafic	TfD	Trafic de dimensionnement (trafic Poids Lourds journalier moyen de la voie la plus chargée)
	TfR	Trafic réel (idem)
	RT	Rapport du trafic de dimensionnement sur le trafic réel
Variables de climat	Tmax	Température maximale mensuelle, calculée sur les 3 ans
	Tmin	Température minimale mensuelle, calculée sur les 3 ans
	Prec	Hauteur des précipitations mensuelles, calculée sur les 3 ans
	Gel	Durée de gel mensuelle, calculée sur les 3 ans
Variable d'état	Aft0 <sup>b</sup>	Fissuration (en %) au dernier relevé avant entretien

\* Les unités sont celles du Système international, sauf celles associées aux températures (degrés Celsius).

a Variables présentant à l'origine des valeurs manquantes et exclues des échantillons complets.

b Variables présentes uniquement dans les échantillons de sections entretenues.

### ➤ Classification suivant l'origine géographique

Étant donné la taille de la base IQRN, seules les données issues des CETE Rhône-Alpes et Sud-Ouest ont été retenues pour l'analyse statistique des sections sans entretien : outre le fait que les données issues de ces deux CETE étaient en nombre suffisant pour assurer la pertinence de l'analyse statistique ultérieure, elles présentaient des différences importantes en matière de caractéristiques climatiques. Les données issues de ces deux CETE ont été étudiées séparément, puis conjointement.

### ➤ Classification suivant l'entretien reçu

Une première analyse statistique a porté sur les sections du CETE Rhône-Alpes, en différenciant les sections qui avaient reçu un entretien de celles qui n'en avaient pas reçu : l'objectif était alors de déterminer si l'entretien modifiait l'évolution des chaussées. Dans l'affirmative, une seconde analyse devait, quant à elle, porter sur les seules sections entretenues : il s'agissait alors de déterminer quels étaient les facteurs pouvant éventuellement influer sur la fissuration des chaussées après entretien. À ce stade, deux facteurs spécifiques aux chaussées entretenues ont été introduits dans le modèle statistique : le niveau de fissuration avant entretien et l'épaisseur de la nouvelle couche de roulement mise en place.

### ➤ Classification suivant les variables explicatives effectivement renseignées

Les champs de la base correspondant aux variables explicatives du **tableau 2** ne sont pas toujours renseignés sur toutes les sections. Chaque étape de la modélisation a donc nécessité la constitution de deux types d'échantillons différents :

- un échantillon dit « complet » (C), incluant toutes les sections mais ne comprenant que les variables explicatives qui ne présentaient pas de valeurs manquantes ;
- un échantillon dit « réduit » (R), incluant uniquement les sections pour lesquelles toutes les variables explicatives étaient disponibles.

### ➤ Classification suivant le nombre d'observations successives disponibles

Enfin, l'application de la méthode indirecte nécessite de disposer d'au moins deux relevés de dégradation non nuls par section. En conséquence, des échantillons de tailles différentes ont dû être spécifiquement créés pour chacune des méthodes statistiques destinées à leur être appliquées.

## ➤ Récapitulatif

Le **tableau 3** récapitule les dix-huit échantillons différents qui ont dû être constitués pour l'analyse statistique.

**tableau 3**  
Récapitulatif des échantillons complets (C) et réduits (R) en termes d'effectifs.

CETE	Critère	MI		MADS	
		C	R	C	R
(a) Sud-Ouest	Sans entretien	879	225	1 197	365
(b) Rhône-Alpes	Sans entretien	569	434	701	526
(c) Rhône-Alpes	Avec entretien	338	84	759	193
Total des sections sans entretien (a+b)		1 448	659	1 898	891
Total des sections de Rhône-Alpes (b+c)		907	518	1 460	719

## ANALYSE STATISTIQUE

### ■ Statistiques descriptives

Les caractéristiques des données étaient similaires pour tous les échantillons. Parmi les sections non entretenues, les sections de chaussées en grave-bitume (72,7 % pour le Sud-Ouest et 93,1 % pour le Rhône-Alpes) étaient plus représentées que les chaussées en grave non traitée. Le type de trafic prédominant était le type T1 (57,3 % pour le Sud-Ouest et 58,3 % pour le CETE Rhône-Alpes), qui correspond à un trafic poids lourds journalier moyen compris entre 300 et 750 camions. Le suivi des dégradations pour le CETE Sud-Ouest (respectivement le CETE Rhône-Alpes) s'est traduit dans 26,5 % (resp. 0 %) des cas par trois relevés nuls, dans 26,5 % (resp. 70,3 %) des cas par deux relevés nuls, dans 28,7 % (resp. 20,7 %) des cas par un relevé nul et dans les 18,3 % (resp. 9,0 %) des cas restants par l'absence de relevé nul. Le **tableau 4** donne les caractéristiques des valeurs des trois relevés en termes de distribution.

**tableau 4**  
Minimum, maximum, moyenne et quartiles des valeurs de l'indicateur de fissuration totale (en %).

		Min	1Q*	2Q*	Moy.	3Q*	Max
1 <sup>er</sup> relevé	Sud-Ouest	0,0	0,0	0,0	4,7	0,0	100,0
	Rhône-Alpes	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	95,0
2 <sup>e</sup> relevé	Sud-Ouest	0,0	0,0	0,0	19,7	27,0	100,0
	Rhône-Alpes	0,0	0,0	0,0	8,1	4,0	100,0
3 <sup>e</sup> relevé	Sud-Ouest	0,0	0,0	34,0	43,0	93,0	100,0
	Rhône-Alpes	1,0	20,0	69,0	60,8	100,0	100,0

\* 1Q = 1<sup>er</sup> quartile, 2Q = 2<sup>e</sup> quartile (médiane), 3Q = 3<sup>e</sup> quartile.

### ■ Analyse en composantes principales

Des analyses en composantes principales (ACP) ont été effectuées pour chaque échantillon, mais elles n'ont pas permis d'en tirer des informations relatives à la structure des données : en effet, pour s'assurer de l'explication de 90 % de la variance<sup>1</sup> – critère habituellement retenu dans le cadre d'une ACP – il fallait retenir au moins six axes. De plus, les valeurs propres associées aux variables explicatives étaient faibles, ce qui empêchait d'attribuer à chacun de ces axes une signification claire. Enfin, la représentation graphique des individus (correspondant aux sections de route) suivant ces nouveaux axes a montré un rapprochement des points sous forme de nuage dense, rendant impossible toute interprétation de l'emplacement des individus en fonction des axes de l'ACP.

<sup>1</sup> Il s'agit d'une proportion cumulée.

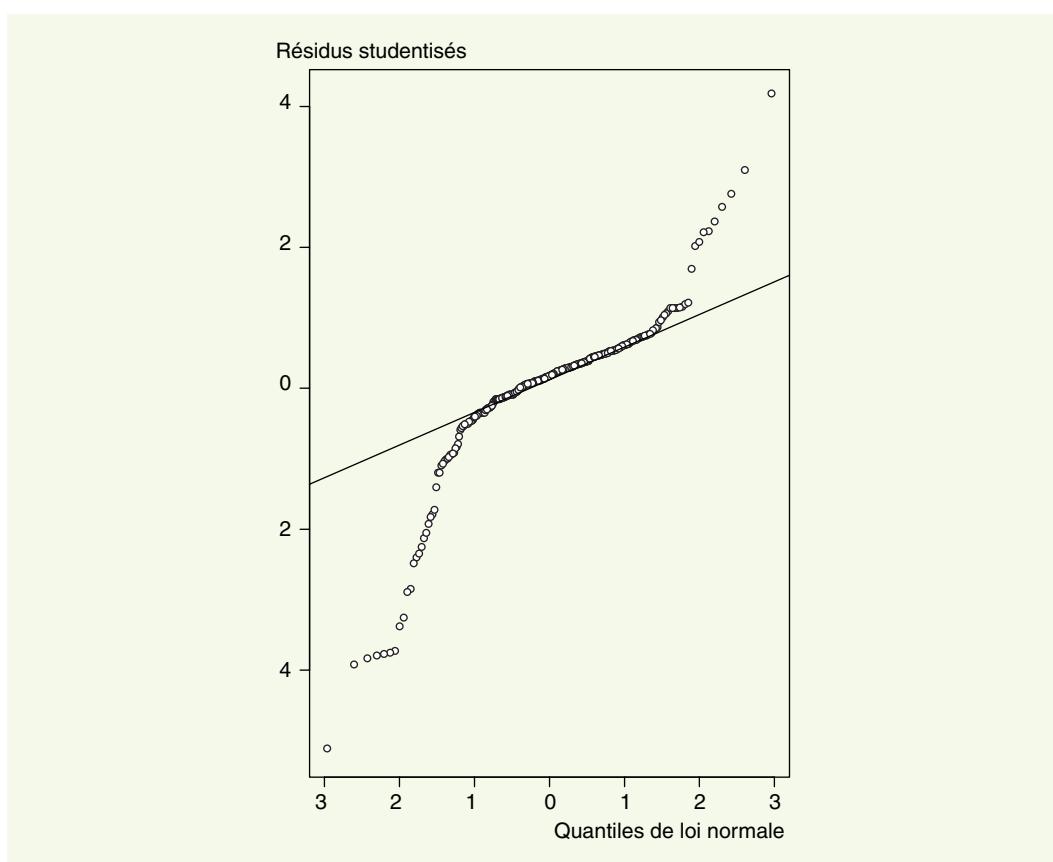
## ■ Application de la méthode indirecte

Cette méthode n'a pas permis de mettre en évidence des variables explicatives significatives : dans tous les cas, le coefficient de corrélation  $R^2$  n'excédait jamais 0,3. De plus, l'adéquation de cette méthode aux jeux de données étudiés s'est révélée mauvaise, quel que soit le type de régression utilisée pour la mise en œuvre (*cf. supra*). Une étude graphique des résidus issus de la régression linéaire de  $\log(t_m)$  (3) montre que la normalité des résidus n'était pas assurée (**figure 2**) : en effet, leurs quantiles ne coïncidaient pas avec ceux d'une distribution normale. Cette étude graphique a été complétée par un test statistique de normalité de ces résidus, qui a conduit au rejet de l'hypothèse nulle de normalité dans tous les cas. Aussi les résultats issus de la méthode indirecte ne peuvent-ils être considérés comme valides ; pour cette raison, ils ne sont pas rapportés ici.

Une explication, au moins partielle, de cette inadéquation peut être avancée. La première étape de cette méthode procède « par différence entre les observations successives faites sur une même section ». Ses résultats sont donc très sensibles aux défauts de référentiel. Si le référentiel terrain (les PR) a été modifié par suite de travaux (redressement de virage, révision de bornage) sans que cela soit reporté dans la base de données, deux observations affectées à la même section dans la base pourront en réalité provenir de deux sections distinctes. L'examen de la base existante montre que ce phénomène ne peut pas être considéré comme absolument marginal. En outre, les erreurs de recueil affectant deux relevés successifs sont amplifiées par l'opération de soustraction.

**figure 2**

Quantiles des résidus (cercles) issus de la régression de  $\log(t_m)$ , en fonction des quantiles d'une loi normale (droite).

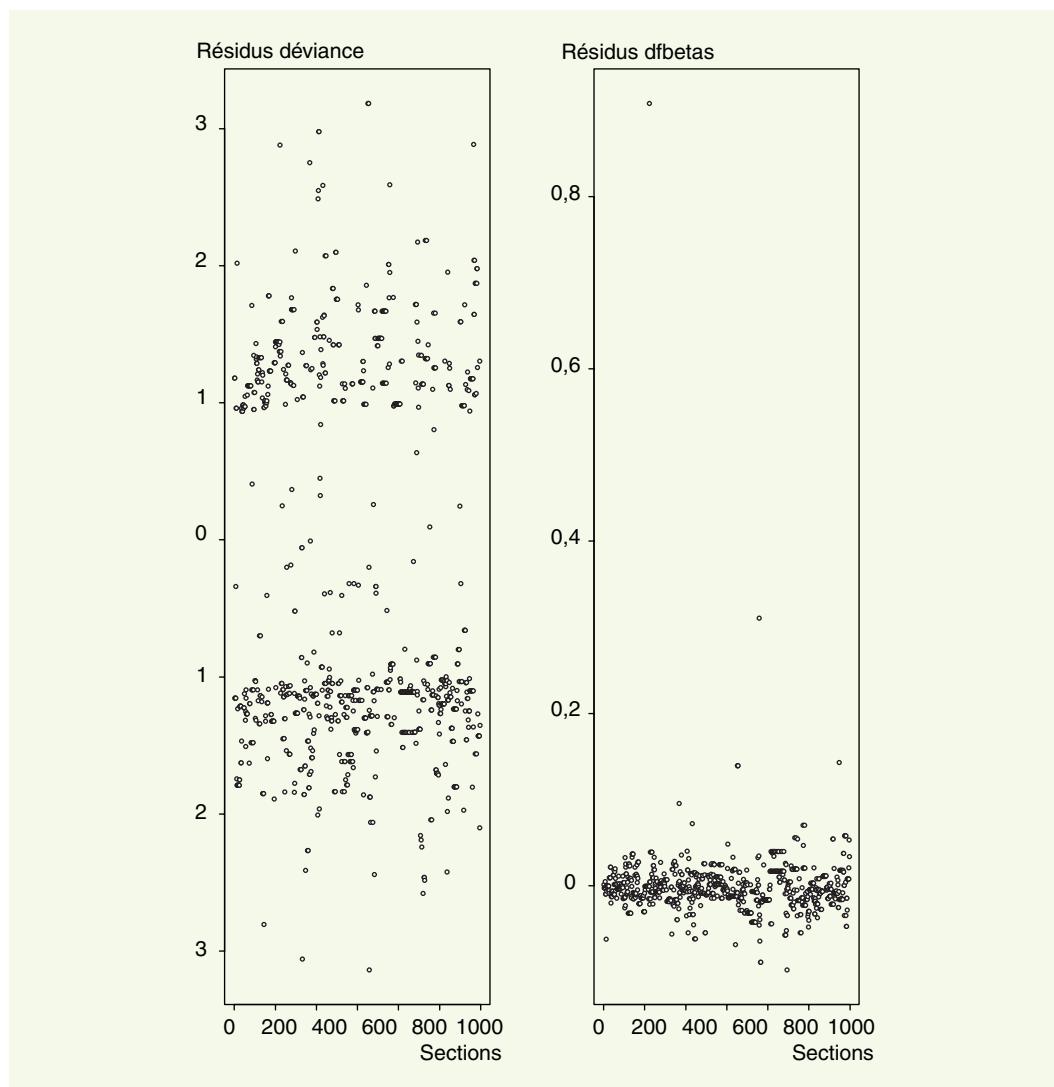


## ■ Application de la méthode d'analyse des données de survie

Contrairement à la méthode indirecte, la MADS a conduit à des modèles présentant une bonne adéquation aux données routières étudiées. Une analyse graphique des résidus a permis de constater que le modèle de Weibull ajustait convenablement les données (**figure 3**) : ainsi, les résidus de type « déviance » sont presque tous compris dans l'intervalle  $[-3, 3]$ , ce qui est parfaitement satisfaisant. De plus, cette étude sur les résidus a permis d'affirmer que le modèle de Weibull était plus adapté aux données que d'autres modèles paramétriques (log-normal, exponentiel, etc.).

**figure 3**

Résidus (cercles noirs) de type « déviance » à gauche et de type « dfbetas » à droite.



### ➤ Analyse uni-variée

Dans cette approche, on teste les variables potentiellement explicatives une à une. Il apparaît que l'épaisseur des différentes couches influence significativement le phénomène de fissuration. En particulier, l'épaisseur du revêtement (variable EpBB) est significative pour l'échantillon du CETE Rhône-Alpes (pour tous les seuils de fissuration S), pour l'échantillon du Sud-Ouest (pour  $S < 60$ ) et pour l'échantillon réduit des deux CETE réunis (pour tout S). Les autres variables d'épaisseur EpCB, EpCNT, EpEq et Epst sont, elles, apparues significatives pour les échantillons du CETE Rhône-Alpes et des deux CETE réunis (pour tout S) dans le cas des échantillons réduits<sup>2</sup>.

En ce qui concerne les variables climatiques, les températures maximale – pour Rhône-Alpes et les deux CETE réunis (pour tout S) – et minimale – pour les deux CETE réunis dans le cas de l'échantillon réduit – agissent significativement sur la fissuration. L'indice de gel est également apparu significatif pour les deux CETE étudiés séparément (quasiment pour tout S), et pour les deux CETE étudiés conjointement lorsque S était inférieur à 50 % (échantillon complet) ou supérieur à 70 % (échantillon réduit). Enfin, la hauteur des précipitations est apparue significative pour le CETE Rhône-Alpes et les deux CETE réunis (pour tout S), et pour le Sud-Ouest (pour tout S) dans le cas de l'échantillon complet.

Enfin, le trafic réel (variable TfR) est apparu significatif pour tous les échantillons complets (pour tout S), et pour le CETE Rhône-Alpes et les deux CETE réunis (pour tout S) dans le cas d'échan-

<sup>2</sup> Rappelons que ces variables sont exclues des échantillons complets, car présentant de nombreuses valeurs manquantes pour ces échantillons.

tillons réduits. Quant au rapport des trafics (RT), il est apparu significatif pour le Sud-Ouest (pour tout S) dans le cas de l'échantillon complet, et pour le CETE Rhône-Alpes et les deux CETE réunis (pour  $S \leq 60\%$ ).

#### ➤ Analyse par triplets

Cette analyse présente l'avantage, par rapport à la précédente, d'étudier l'effet conjoint de plusieurs variables explicatives. Cependant, la procédure de sélection du triplet de variables explicatives le plus explicatif ne tient pas compte de la possible multicolinéarité de ces variables. Aussi retrouve-t-on souvent, parmi les variables explicatives les plus significatives, des variables fortement corrélées, comme la température minimale et l'indice de gel (coefficients de corrélation égal à 0,86).

Les variables d'épaisseur des couches (EpBB et EpCB) sont apparues significatives lors de l'étude des échantillons réduits des deux CETE (pour tout S), considérés séparément ou conjointement. Dans tous les cas, les températures maximale et/ou minimale, la hauteur des précipitations et l'indice de gel sont également apparues significatives. Enfin, deux variables caractérisant le trafic sont apparues significatives dans certains cas : le rapport du trafic réel au trafic de dimensionnement (variable RT) sur l'échantillon complet pour le CETE Sud-Ouest (pour  $S \geq 65$ ), et le trafic de dimensionnement (variable TfD) sur l'échantillon réduit pour les deux CETE étudiés conjointement (pour tout S).

#### ➤ Analyse par sélection descendante

Le **tableau 5** fournit les résultats de l'analyse statistique par sélection descendante, qui sont similaires à ceux des analyses précédentes. Ainsi, l'épaisseur de la couche de roulement (EpBB), les températures maximale (Tmax) et minimale (Tmin), la hauteur des précipitations (Prec), l'indice de gel (Gel) et le trafic réel (TfR) constituent des variables significatives. Les épaisseurs des autres couches (EpCB et EpCNT) et les autres variables liées au trafic (TfD et RT) apparaissent comme significatives de façon plus ponctuelle.

**tableau 5**  
Analyse par sélection descendante : seuils de fissuration pour lesquels les variables sont significatives, pour les échantillons complets (C) et réduits (R).

Variable	Sud-Ouest		Rhône-Alpes		Réunis	
	C	R	C	R	C	R
EpBB	< 60	< 100	5	> 60	< 35	5-100
EpCB		> 65		5-100		5-100
EpCNT		> 45		> 60		> 60
Tmax	< 90		5-100	> 5	> 40	> 10
Tmin	> 35	< 75			< 100	5-100
Prec	5	5-100	5-100	5-100	5-100	5-100
Gel	< 30		5-100	5-100	5-100	5-100
TfR	> 80		> 40	> 60	5-100	
TfD	> 80					5-100
RT	< 85	65-80				

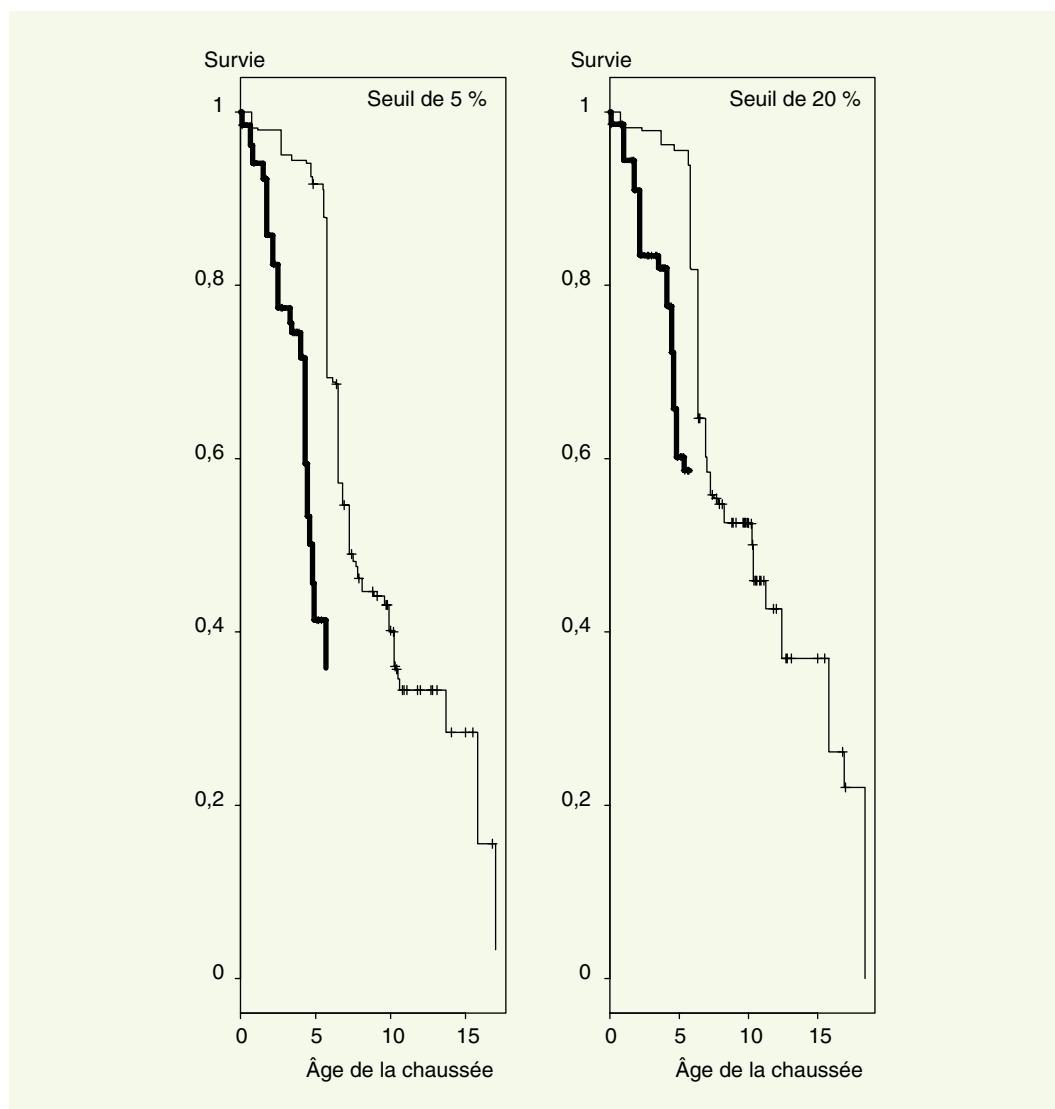
## ÉTUDE DE L'EFFET D'UN ENTRETIEN

① La première étape, consistant à comparer sections non entretenues et sections entretenues, s'est faite en introduisant, dans le modèle, une variable binaire indiquant, pour chaque section, la présence ou non d'une couche d'entretien. Un test de signification portant sur cette variable, après ajustement sur les autres variables explicatives<sup>3</sup>, a permis de conclure que les sections suivaient des lois d'évolution significativement différentes ( $P < 0,001$ ) selon qu'elles avaient bénéficié ou non de travaux d'entretien. La **figure 4** illustre cette différence en termes de fonction de survie : pour les

<sup>3</sup> C'est-à-dire dans le cadre d'un ajustement multiple.

**figure 4**

Fonctions de survie pour les sections sans entretien (courbe en trait fin) et avec entretien (courbe en gras).



seuils représentés (5 et 20 %) et pour un âge donné, une section entretenue présente une probabilité plus faible de ne pas avoir atteint ces seuils qu'une section non entretenue.

② La seconde étape a consisté en une analyse de la significativité des variables explicatives, pour l'échantillon comprenant toutes les sections entretenues du CETE Rhône-Alpes, ce CETE étant celui pour lequel on disposait de l'information nécessaire concernant les travaux d'entretien. Deux nouvelles variables explicatives ont été introduites dans le modèle multiple : l'épaisseur de la couche d'entretien mise en place (variable EpCr) et la valeur du dernier relevé de dégradation réalisé avant entretien (variable Aft0).

Sur l'échantillon complet, une seule variable explicative est apparue significativement liée au phénomène de fissuration, et ce pour tous les seuils modélisés : il s'agit de la valeur du dernier relevé de dégradation avant travaux d'entretien ( $P < 0,001$ ). Sur l'échantillon réduit, trois types de variables explicatives se sont révélées significatives :

- les épaisseurs des couches : il s'agit d'EpCr pour des seuils compris entre 30 et 45 % ( $P = 0,020$ ), d'EpBB pour des seuils compris entre 20 et 60 % et d'EpCB pour des seuils compris entre 30 et 55 % ;
- la hauteur des précipitations, pour des seuils compris entre 30 et 45 % ( $P = 0,030$ ) ;
- la valeur du dernier relevé de dégradation avant entretien, pour des seuils compris entre 50 et 80 % ( $P = 0,040$ ).

## ■ Interprétation physico-mécanique

Il est indispensable de chercher à interpréter les résultats obtenus par les analyses statistiques, tels qu'ils sont présentés dans le paragraphe précédent, à la lumière des connaissances accumulées par les experts en comportement des chaussées, qu'elles proviennent d'essais de laboratoire, de suivi de sections particulières ou d'études de diagnostic de chaussées endommagées. Il est d'abord utile de noter que, dans l'ensemble, les signes de ces coefficients s'appliquant aux variables explicatives identifiées – présentés dans le **tableau 6** – sont assez stables sur l'ensemble des seuils de dégradation modélisés, pour un échantillon donné. Par contre, une variation de signe survient parfois lors du passage d'un échantillon à un autre.

**tableau 6**  
*Rapprochement des analyses statistiques et de « l'expertise métier ».*

Variable	Signe du coefficient	Impact*	Confirmation par « l'expertise métier »
EpBB	–	accélération	Non
EpCB	+	ralentissement	Oui
Tmax	+	ralentissement	Oui
Tmin	+	ralentissement	Oui
Prec	–	accélération	Oui
Gel	+	ralentissement	Non
RT	+	ralentissement	Oui
Aft0	–	accélération	Oui

\* Impact sur la vitesse d'évolution de la fissuration lorsque la valeur de la variable croît.

Certaines conclusions de l'analyse statistique apparaissent immédiatement comme conformes à « l'expertise métier ». Ainsi, plus l'assise est épaisse, mieux la chaussée résiste à la fissuration de fatigue. De même, une diminution des précipitations se traduit par une meilleure résistance de la chaussée à la fatigue : moins il pleut, moins la teneur en eau du sol ou de l'assise non traitée est élevée et plus ces couches sont « portantes ». On note encore que, pour un trafic réel donné, plus fort était le trafic pris en compte lors du dimensionnement, mieux la chaussée se comportait. Finalement, la fissuration d'une chaussée ayant fait l'objet d'un recouvrement réapparaît d'autant plus vite que cette fissuration était étendue juste avant les travaux.

L'influence des températures auxquelles est soumise la chaussée est également explicable par les connaissances du comportement des matériaux. Des températures moyennes annuelles élevées correspondent à des climats où les périodes froides, durant lesquelles les couches bitumineuses sont durcies ou fragilisées par le froid, sont plus rares ou plus courtes. À défaut de connaître les caractéristiques précises des bitumes employés sur chaque section, il est toutefois difficile d'aller plus loin dans cette interprétation.

À l'inverse, l'influence de l'épaisseur de la couche de roulement (variable EpBB) n'est *a priori* pas conforme à l'avis couramment formulé par les experts : d'après l'analyse statistique, plus la couche de roulement est épaisse, plus la fissuration initiale apparaît vite. Face à ce constat, il convient d'abord de rappeler que l'indicateur analysé combine la fissuration de fatigue (remontant des couches d'assise vers la surface) et la fissuration thermique (descendant de la surface vers le fond de la couche de roulement). Or, si la fissuration de fatigue remonte effectivement plus rapidement à travers les couches de roulement plus fines, il n'en est pas de même pour la fissuration thermique. Selon la part de chaque type de fissuration dans la résultante observée, le sens de variation constaté par l'analyse statistique peut ne pas être en contradiction avec l'avis d'expert.

De même, d'après l'analyse statistique, plus élevé est l'indice de gel, moins rapide est l'évolution de cette fissuration, ce qui va à l'inverse de toutes les connaissances acquises. La remarque faite pour l'influence de l'épaisseur de la couche de roulement peut être invoquée ici aussi. En outre, on

note que la plupart des données des différents échantillons proviennent de chaussées hors gel (couche de forme appropriée pour empêcher le front de gel d'atteindre des sols gélifs), ce qui renforce le questionnement sur le sens à donner à la significativité de l'effet de la variable gel.

La remarque concernant l'agrégation, au sein de l'indicateur analysé, de deux phénomènes physiques distincts, influencés par des variables différentes, si elle permet d'avancer des explications pour les divergences entre certaines déductions de l'analyse statistique et « l'expertise métier », peut conduire à s'interroger sur la convergence de ces approches en ce qui concerne l'influence d'autres variables explicatives (épaisseur de l'assise, impact des précipitations, effet des températures de fonctionnement). Il y a là des enseignements à en tirer pour la constitution des bases de données. Sur un plan plus opérationnel, la règle qui est proposée, pour l'application de ces approches à l'identification des lois d'évolution des dégradations, est la suivante :

- lorsque l'analyse statistique converge avec « l'expertise métier » pour déclarer une variable explicative, celle-ci est retenue comme telle ;
- dans le cas contraire, la variable ne peut pas être retenue dans la formulation de la loi.

L'influence des variables potentiellement explicatives (d'après l'expertise), mais non retenues au terme de l'analyse statistique, ne pourra être prise en compte que globalement et au travers du concept de robustesse.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude d'une partie de la base de données IQRN a permis de mettre en évidence l'inadéquation de la MI à l'analyse des données de dégradations de chaussées. Toutefois, une gestion toujours plus précise du référentiel des bases de données pourrait, à terme, permettre de revoir cette conclusion. *A contrario*, la MADS s'est révélée satisfaisante du point de vue de la qualité de l'ajustement du modèle aux données de site.

Il a été montré que, sur les échantillons analysés, certaines variables expliquaient partiellement mais effectivement le développement de la fissuration, l'influence mise en évidence étant cohérente avec les connaissances acquises par d'autres approches d'experts en comportement des chaussées (épaisseur de la couche de base, températures d'environnement, précipitations). D'autres variables semblent aussi influer sur le comportement de la chaussée, mais dans un sens inverse à celui auquel on pourrait s'attendre. Il en va ainsi de l'épaisseur du revêtement ou de l'indice de gel. Enfin, l'impact de certaines variables est suffisamment marginal pour ne pas ressortir des résultats des analyses statistiques : épaisseur de la couche de fondation, épaisseur équivalente de la chaussée, déformations transversales en fond de couche telles qu'issues du dimensionnement, trafic de dimensionnement. Ceci montre qu'il faut être prudent dans l'exploitation des résultats et des conclusions de l'analyse statistique de données routières. Ces analyses, indispensables en gestion prévisionnelle de l'entretien routier, ne peuvent être menées sans un guidage rigoureux par « l'expertise métier ». Il est donc proposé de n'introduire une variable explicative de façon explicite dans la formulation de la loi d'évolution d'un indicateur que si les analyses statistiques et « l'expertise métier » s'accordent sur son influence. L'influence des autres variables potentiellement explicatives (d'après l'expertise) ne pourra être prise en compte que globalement et au travers du concept de robustesse [3].

Cette étude pointe certaines voies de progrès, notamment en ce qui concerne la constitution et la gestion des bases de données routières.

Au-delà des données qui sont collectées pour une gestion de l'entretien à court terme, ces bases doivent être enrichies des variables explicatives nécessaires pour anticiper l'évolution de l'état des chaussées et l'effet des travaux d'entretien. Ce sont généralement des données acquises lors des travaux de construction ou de renforcement (les caractéristiques essentielles des matériaux, par exemple) et malheureusement perdues par la suite, lors du passage de la phase de construction à

la phase de gestion de la route. C'est donc dans cette phase critique que des progrès substantiels peuvent être faits.

Il est aussi très clair – mais les évidences le deviennent souvent après qu'on en a fait le constat – qu'il est difficile de traiter par des voies purement statistiques l'évolution d'un indicateur qui combine au moins deux phénomènes physiques distincts, en l'occurrence la fissuration de fatigue et la fissuration par retrait thermique, surtout lorsqu'ils ont des origines et des modes d'évolution distincts. Le gestionnaire, lorsqu'il (re-)définit les procédures d'auscultation de son réseau, peut donc voir un intérêt – à moyen et à long terme – à recueillir des données élémentaires traduisant des phénomènes physiques bien identifiés, même s'il n'en voit pas l'utilité immédiate. Ainsi, en faisant relever de façon distincte les fissurations de fatigue et les fissurations thermiques, et même si cette distinction n'est pas indispensable pour une évaluation du réseau tel qu'il se présente au moment de l'auscultation (court terme), le gestionnaire se donnera les moyens de construire des modèles d'évolution plus pertinents et plus précis pour ces phénomènes et, ainsi, de conduire une gestion prévisionnelle (à long terme) plus sûre.

D'une façon générale, la qualité des informations disponibles dans la base est déterminante pour la pertinence des études dans lesquelles elles sont utilisées, notamment pour la modélisation du comportement des chaussées. Les causes d'imprécisions sont multiples et nécessitent des actions correctives appropriées :

- les méthodes de recueil de données – et notamment de recueil visuel – souffrent, aujourd'hui encore, d'une précision insuffisante. Les progrès qui sont faits régulièrement sur ce point laissent espérer une amélioration graduelle des analyses, donc des lois d'évolution des dégradations ;
- le référentiel (le système de localisation des informations) évolue au gré des travaux de rectification de géométrie, par exemple, et il est important que le gestionnaire ait une très bonne traçabilité de ces évolutions ;
- d'autres informations, comme les travaux effectivement réalisés, doivent être tenues à jour. Seuls les services de terrains peuvent veiller efficacement à ces mises à jour et il est donc important qu'ils soient sensibilisés à ces tâches ; pour cela, il faut qu'ils soient, sous une forme ou une autre, bénéficiaires des travaux qui sont faits sur les bases de données.

D'un point de vue plus purement statistique, on notera que la base de données originelle comportait de nombreuses sections identiques<sup>4</sup> (tant du point de vue des valeurs des relevés de dégradation que de celles prises par les variables explicatives) et un nombre non négligeable de valeurs aberrantes (relevés de dégradation non progressifs dans le temps, dégradation diminuant dans le temps, etc.). Des études complémentaires doivent porter sur la prise en compte de la non-indépendance des relevés effectués sur des sections contiguës : dans le cadre de la MADS, des méthodes telles que la modélisation marginale [16] ou la modélisation par fragilité [17] permettent de prendre en compte cette corrélation entre sections adjacentes.

## REMERCIEMENTS

*Les auteurs remercient la Direction des routes, et le SETRA en particulier, pour leur avoir donné accès aux données recueillies dans le cadre des opérations périodiques d'évaluation du réseau routier national (opérations IQRN).*

<sup>4</sup> Il s'agissait le plus souvent de sections contiguës.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Guide technique LCPC-SETRA, 1994.
- 2 RÈCHE M., Effet des travaux d'entretien sur les lois d'évolution des dégradations de chaussées, Thèse de doctorat ès sciences de l'ingénierie civile, université Blaise Pascal - Clermont II, Clermont-Ferrand, 2004, 169 pages.
- 3 LEPERT P., SAVARD Y., LEROUX D., RÈCHE M., Méthodes statistiques de prévision de l'évolution d'une chaussée, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 250-251, 2004, pp. 13-31.
- 4 LEPERT P., LEROUX D., SAVARD Y., Use of pavement performance models to improve efficiency of data collection procedures, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, University of Minho, Guimaraes, Portugal, 2003.
- 5 LEROUX D., LEPERT P., RÈCHE M., SAVARD Y., Comparison of three statistical methods for fatigue cracking prediction, 83<sup>rd</sup> TRB Annual Meeting, Washington D.C., États-Unis, 2004.
- 6 LEROUX D., Identification de modèles d'évolution par régression non linéaire multivariables (méthode « directe »), Projet de coopération franco-qubécois sur les modèles de performances des chaussées, Rapport 9c, LCPC-MTQ, Québec, 2003.
- 7 LEPERT P., RIOUALL A., Identification de modèles d'évolution par régression non linéaire (méthode « indirecte »), Projet de coopération franco-qubécois sur les modèles de performances des chaussées, Rapport 9, 2002.
- 8 ENKEL S., Modélisation de la fissuration transversale par les chaînes de Markov, DESS de Modélisation stochastique et recherche opérationnelle, Bordeaux I, 1996, 82 pages.
- 9 COURILLEAU E., Analyse statistique de données routières appliquée au développement de modèles de gestion de l'entretien, Thèse de doctorat ès sciences de l'ingénierie civile, université Blaise Pascal – Clermont II, Clermont-Ferrand, 1997, 148 pages.
- 10 DROESBEKE J.-J., FICHET B., TASSI P., Analyse statistique des durées de vie, *Économica*, 1989.
- 11 AKAIKE H., Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, *International Symposium on Information Theory*, Budapest, 1973.
- 12 THERNEAU T.M., GRAMBSCH P.M., FLEMING P.R., Martingale-based residuals for survival models, *Biometrika*, vol. 77, 1990, pp. 147-160.
- 13 BERTRAND L., LEPERT P., Méthode de relevés des dégradations de surface des chaussées, Méthode des LPC 38.2, 1998.
- 14 ULLIDTZ P., *Pavement analysis*, Elsevier Science, 1987.
- 15 Logiciel ALIZÉ-LCPC, Itech Entreprise, 1991.
- 16 WEI L.J., LIN D.Y., WEISSFELD L., Regression analysis of multivariate incomplete failure time data by modelling marginal distributions, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 84, 1989, pp. 1065-1073.
- 17 VAUPEL J.W., MANTON K.G., STALLARD E., The impact of heterogeneity in individual frailty on the dynamics of mortality, *Demography*, vol. 16, 1979, pp. 439-454.