

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

Proposition et utilisation d'un indice structurel à partir des notes IQRN

■ RÉSUMÉ

Dans le système français d'aide à la gestion des chaussées, GiRR, la qualité structurelle d'ensemble d'une chaussée est appréciée par le biais d'une note « patrimoine » déduite des dégradations relevées à la surface de cette chaussée. Cette note traduit donc un état structurel apparent, souvent assez différent de l'état réel. Ceci interdit son emploi pour évaluer les effets structurels des techniques, donc des stratégies d'entretien, ou encore comme variable explicative de l'évolution des dégradations. Pour remédier à cette lacune, un « indice structurel » est établi en combinant des éléments de mécanique des chaussées et des résultats de la méthode d'évaluation « image qualité des routes nationales » (IQRN). On montre comment cet indice peut être exploité pour évaluer l'état structurel réel d'une chaussée et l'effet de travaux d'entretien, mais aussi comme variable explicative de l'évolution des dégradations et pour réaliser des études économiques.

Proposal and use of a structural index based on iqrn scores

■ ABSTRACT

Within the French pavement management system (called GiRR), the overall structural quality of a pavement can be assessed by means of a "facility" rating deduced from the distresses identified on the pavement surface. This score reflects an apparent structural condition, which often differs substantially from the actual state ; this condition prohibits use of the indicator for purposes of evaluating the structural effects of techniques, hence of maintenance strategies, or moreover as an explanatory variable for the evolution in pavement degradation. To overcome this shortfall, a "structural index" has been developed by combining a pavement's mechanical aspects with results from the "quality imaging of the national road network" (IQRN) evaluation method. It will be shown how this index may be utilized not only to assess the actual structural state of a pavement and the impact of maintenance work, but also as an explanatory variable of the evolution in degradation and as input into economic studies.

POSITION DU PROBLÈME

Dans le système français d'aide à la gestion des routes [1], la méthode d'évaluation de l'état des structures de chaussée s'appuie sur le relevé de certaines dégradations de surface : une note d'état structurel est calculée en combinant les fissurations et les déformations du profil transversal [2]. En conséquence, tous les traitements qui corrigent apparemment ces dégradations sont considérés comme ayant le même effet structurel : ils ramènent la structure de chaussée à l'état neuf et la note structurelle à sa valeur maximale. Il est bien évident que ceci n'est pas exact. Une couche de béton bitumineux (BB) mince et un renforcement, s'ils suppriment tous les deux les dégradations de surface, n'ont pour autant pas le même effet structurel. C'est encore plus vrai si on compare l'application d'un enduit superficiel et d'un renforcement à une chaussée à assise traitée souffrant de fissuration de fatigue.

Cette situation présente plusieurs inconvénients pour le bon usage des systèmes d'aide à la gestion de l'entretien. On peut notamment remarquer que :

- la simulation du comportement d'une chaussée après un entretien peut s'écarter de la réalité dans de fortes proportions, si l'effet structurel de cet entretien est mal évalué ;
- l'estimation de l'effet structurel d'une politique d'entretien sur un réseau de routes peut être biaisée ; actuellement, l'usage de la note structurelle donne un « bonus » aux traitements minces sur les chaussées fissurées, au détriment des travaux lourds dont l'apport structurel n'est donc pas valorisé.

Pour remédier à cette lacune, il faut disposer d'un indice d'état structurel qui reflète mieux l'état interne de la chaussée et son évolution, qui pilote correctement l'évolution des dégradations de surface ayant une origine structurelle, et sur lequel l'effet des travaux soit bien apprécié. Or, il n'existe pas, aujourd'hui, de mesures qui puissent être mises en œuvre au niveau d'un réseau et qui apportent une information pertinente sur l'état réel des structures de chaussée modernes, le plus souvent à assise traitée.

Grâce au recul dont on dispose aujourd'hui sur le comportement de ces chaussées, on peut espérer bâtir un indice structurel fondé à la fois sur les observations faites à sa surface et sur les caractéristiques géométriques (épaisseur des couches) et mécaniques (nature des matériaux) de la chaussée initiale et de ses entretiens successifs. Pour cela, il faut être en mesure de rapprocher deux domaines jusqu'ici développés de façon parallèle : la mécanique des chaussées (vue sous l'angle du dimensionnement) et l'auscultation structurelle. Il est, en particulier, nécessaire d'étudier comment le dimensionnement d'une chaussée conditionne son évolution structurelle « apparente ». C'est ce à quoi s'attache l'étude rapportée ici, qui propose ensuite un indice structurel et montre comment celui-ci réagit aux entretiens.

Il convient de garder à l'esprit que l'indice structurel est un concept exclusivement destiné à un usage dans le cadre d'études portant sur des réseaux routiers, niveau auquel on ne dispose que d'informations sommaires autorisant l'application de méthodes d'exploitation simples, nécessairement fondées sur des hypothèses réductrices. En aucun cas, il ne faut voir ou rechercher dans cet indice structurel un outil pouvant intervenir dans une étude de diagnostic ou de choix de solution d'entretien, et encore moins dans un processus de dimensionnement.

LA NOTE PATRIMOINE DE L'IQRN ET SON ÉVOLUTION

■ Les notes IQRN

Le réseau routier national français fait l'objet d'un suivi qui s'appuie sur deux notes de synthèse, l'une traduisant l'état des structures de chaussées, l'autre l'état de leurs surfaces. Ces deux notes sont elles-mêmes calculées à partir des dégradations observées (fissuration, arrachement, etc.) et des caractéristiques mesurées (adhérence, déformations transversales) de surface des chaussées. Ces informations sont recueillies et interprétées dans le cadre de l'opération « image qualité des routes nationales » (IQRN) [2], avec une périodicité de trois ans.

La note de structure est également appelée « note patrimoine » car elle a été conçue pour informer le gestionnaire sur l'état de son patrimoine et sur son comportement probable à moyen et long terme. Établie pour chaque section de 200 mètres, cette note résulte d'une combinaison de l'extension des fissurations et de celle des déformations du profil transversal, principalement l'orniérage structurel. Elle varie comme l'opposé du rapport entre le coût, C , des travaux théoriquement nécessaires pour remettre la chaussée à neuf (travaux définis à dire d'expert, compte tenu de son état, de son trafic et du type de structure) et le coût, C_{\max} , des travaux de reconstruction d'une chaussée lourde (par convention, une chaussée semi-rigide supportant un trafic $> T0$) complètement ruinée,

travaux qui ont été fixés à 20 cm de grave bitume (GB) plus 8 cm de béton bitumineux (BB). La formule suivante est appliquée :

$$N = 20 \left(1 - \left[\frac{C}{C_{\max}} \right] \right) \quad (1)$$

On voit que cette note varie de 20 (structure à l'état neuf) à N_{\min} (structure ruinée). Le seuil N_{\min} dépend de la famille de la chaussée [combinaison du type de structure (NT, GB, GH, MX) et de la classe de trafic lourd (T0, T1, T2, etc.)]. Ainsi, sur une structure en grave bitume (GB) supportant un trafic T0, la remise à neuf après une ruine totale nécessite un renforcement équivalent à 16 cm de GB plus 8 cm de BB. Moyennant l'hypothèse, faite en 1992, que GB et BB ont un coût sensiblement équivalent, la note N_{\min} vaut :

$$N = 20 \left(1 - \left[\frac{\text{coût}(8\text{BB}+16\text{GB})}{\text{coût}(8\text{BB}+20\text{GB})} \right] \right) = 20 \left(1 - \left[\frac{\text{coût}(8\text{BB}+16\text{BB})}{\text{coût}(8\text{BB}+20\text{BB})} \right] \right) = 20 \left(1 - \left[\frac{27,2}{32} \right] \right) = 3 \quad (2)$$

Sur le même type de structure, mais sous un trafic T2-T3, la remise à neuf après la ruine demande un renforcement de 12 cm de GB plus 6 cm de BB et, de ce fait, la note N_{\min} vaut :

$$N = 20 \left(1 - \left[\frac{\text{coût}(6\text{BB}+12\text{GB})}{\text{coût}(8\text{BB}+20\text{GB})} \right] \right) = 20 \left(1 - \left[\frac{\text{coût}(6\text{BB}+12\text{BB})}{\text{coût}(8\text{BB}+20\text{BB})} \right] \right) = 20 \left(1 - \left[\frac{18}{28} \right] \right) = 7 \quad (3)$$

On notera que, selon ces formules, lorsque l'épaisseur nécessaire pour restaurer l'état neuf d'une chaussée varie de 1,4 cm, la note descend en moyenne de 1 point.

■ Loi d'évolution de la note patrimoine

À la différence des dégradations qui évoluent assez régulièrement, la note patrimoine peut, de par son mode de calcul, marquer des paliers ou, au contraire, des variations assez brusques. Néanmoins, différentes études [3-5] ont montré que l'évolution de cette note peut être assimilée à une courbe sensiblement sigmoïde, répondant à l'équation :

$$N(t) = 20 + (N_{\min} - 20) \cdot \frac{t^p}{A^p + t^p} \quad (4)$$

où p est une constante, appelé « facteur de forme », et A , dit « âge de mi-évolution », est l'âge auquel la note N aura décru de 50 % de sa plage de variation.

Dès lors qu'on dispose d'un ensemble suffisamment complet d'observations sur une famille de chaussées, on peut déterminer l'âge de mi-évolution de la note patrimoine de ces chaussées. En appliquant à ces données une méthode statistique dérivée de la théorie des lois de survie (cf. annexe et [3, 4]), on peut calculer rigoureusement plusieurs points de la courbe d'évolution de sections représentant différents quantiles (5 %, 10 %, 50 %, 95 %, etc.) dans la population. En ajustant l'équation (4) à ces différentes courbes d'évolution, on obtient, pour chaque quantile, une valeur du facteur de forme p et une valeur de l'âge de mi-évolution A . L'expérience montre que les valeurs de p et de A sont liées par une relation qui peut être, en première approche, assimilée à une relation linéaire :

$$A = \alpha \cdot p + \beta \quad (5)$$

Il reste à calculer précisément l'âge de mi-évolution de chaque section. Ce paramètre est obtenu à partir de l'âge de l'observation faite sur cette section et de la note correspondante, en inversant (4) par une procédure itérative. La fonction de répartition de ces âges estimés sur toutes les sections est de type Log-normale inversée.

Enfin, les travaux d'entretien ramènent la note patrimoine à la valeur initiale (= 20) dès l'instant qu'ils sont en pleine largeur et d'une certaine épaisseur (> 4 cm). Toutefois, cette note recommence ensuite à évoluer, de façon plus ou moins rapide selon que l'entretien aura renforcé ou non la structure. Le nouvel âge de mi-évolution sera, en conséquence, plus court ou plus long.

Remarque : L'équation (4) ne s'inverse pas pour des notes égales à 20 ou à N_{\min} . La note 20 ne peut, en théorie, être atteinte que lorsque $t = 0$, et la note N_{\min} , jamais. En pratique, elles sont largement présentes dans les bases de données (en particulier $N = 20$ pour $t > 0$) et peuvent être considérées comme résultant de l'arrondi de notes un peu inférieures à 20 ou un peu supérieures à N_{\min} . Pour surmonter cette difficulté, on substitue à ces notes des valeurs décimales, établie par une approche probabiliste de la distribution réelle de ces notes extrêmes.

EXEMPLE « FIL ROUGE »

Pour illustrer les concepts introduits et développés dans ce qui suit, on a considéré un vaste ensemble de sections appartenant au réseau national, toutes construites avec une assise en grave bitume (GB) et supportant un trafic fort (T0 à ST0), sur lesquelles on dispose de relevés et de mesures renouvelés deux ou trois fois, chaque fois à trois années d'intervalle. Au total, ce sont 21 655 observations (un âge, une note), réalisées sur des sections de 200 m de longueur lors des campagnes IQRN de 1998, 1999 et 2000, qui sont exploitées pour cet exemple. Les figures 1 et 2 présentent la distribution de l'âge des sections et de leur note, égale à 20 sur une proportion importante des sections.

On détermine l'âge de mi-évolution de toutes les sections par la méthode dérivée des lois de survie (cf. annexe). Le calcul confirme la quasi-linéarité de la relation (5) existant entre les paramètres A et p, avec les coefficients :

$$\alpha = 22,18$$

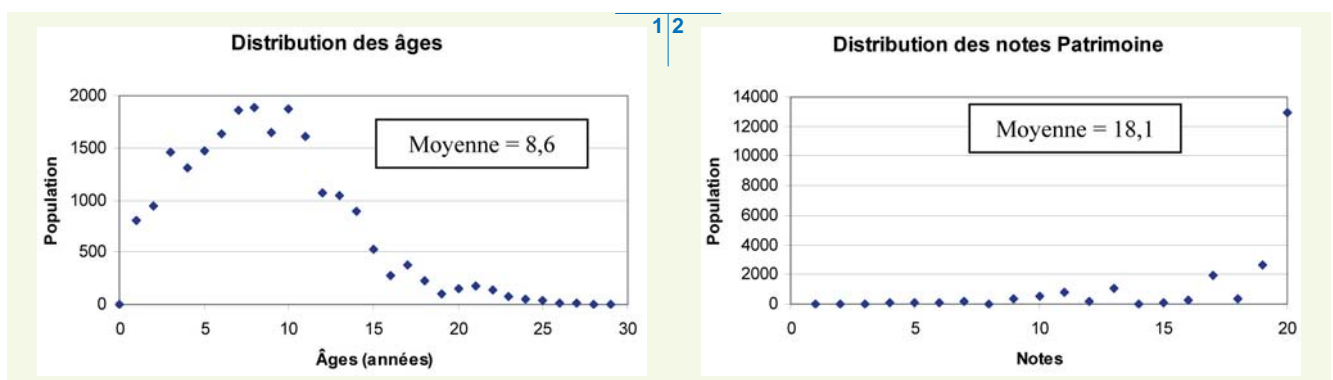
$$\beta = 19,43$$

Remarque : Les sections observées ont, pour la plupart, fait l'objet d'une ou plusieurs interventions d'entretien entre leur construction et leur observation. L'historique précis de ces interventions n'est pas conservé dans la base de données, où seuls l'âge de la dernière couche d'entretien (des derniers travaux de pleine largeur) et la note patrimoine déduite des observations faites sur cette couche sont systématiquement disponibles. Le modèle qui peut être développé dans un premier temps, et à partir de ces seules données, traduit donc le comportement des chaussées en GB telles qu'elles ont été conçues, dimensionnées, construites et entretenues.

On peut en déduire les courbes de distribution et de répartition de ce paramètre. On constate ainsi (figure 3) que ces courbes suivent sensiblement une loi Log-normale retournée (c'est-à-dire que les valeurs « $\hat{\text{Âge}}_{\max} - \text{âge}$ » suivent une loi Log-normale, avec $\hat{\text{Âge}}_{\max} = 75$ ans).

figure 1
Distribution des âges des observations.

figure 2
Distribution des notes.



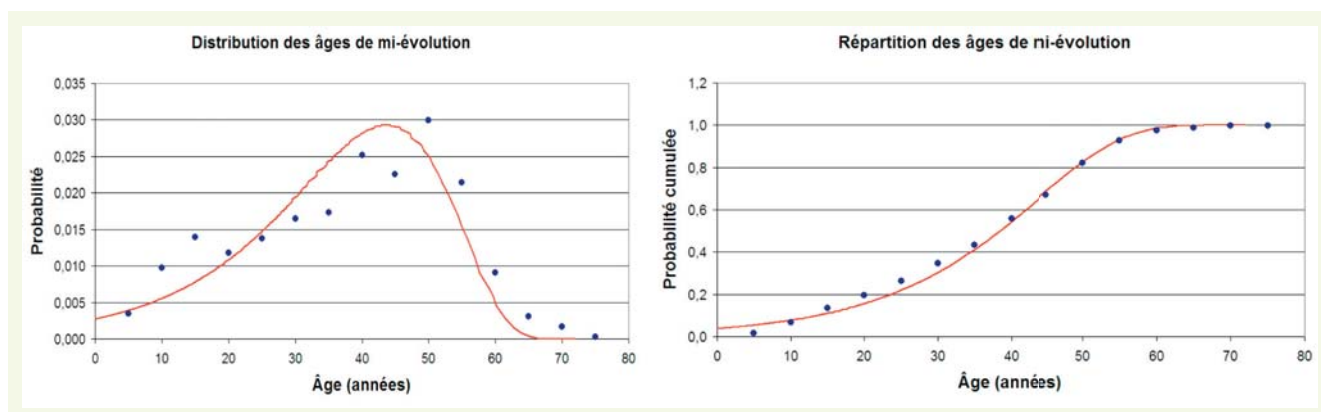


figure 3

Distribution et répartition de l'âge de mi-évolution des 21 665 sections ; valeurs expérimentales (points) et lissage (courbe continue).

PROPOSITION D'INDICE STRUCTUREL

■ Définition

L'indice structurel qui est proposé ici est fondé sur la notion d'épaisseur équivalente développée par Odemark [6]. Par souci d'homogénéité, on ramène l'épaisseur de la chaussée à celle d'une chaussée entièrement en béton bitumineux (BB) de module égal à 5 400 MPa (à 15 °C).

Soient h_i et \overline{E}_i les épaisseurs et modules (à neuf) des différentes couches qui composent la chaussée (au-dessus du substratum), l'indice i valant 1 pour la couche superficielle et croissant vers le fond de la chaussée, l'épaisseur équivalente d'une chaussée neuve s'écrit :

$$\overline{h}_e = \sum_i \left[h_i \cdot \left(\frac{\overline{E}_i}{5400} \right)^{1/3} \right] \quad (6)$$

Pour obtenir un indice adimensionnel, on calcule l'épaisseur équivalente d'une chaussée neuve bien dimensionnée (au sens de la méthode française de dimensionnement [7]) compte tenu de la portance du sol support et du trafic que supporte la chaussée considérée : \overline{h}_{e0} . On appelle indice structurel \overline{I} à neuf le rapport :

$$\overline{I} = \frac{\overline{h}_e}{\overline{h}_{e0}} \quad (7)$$

L'indice structurel à neuf ainsi défini :

- vaut 1 pour une chaussée neuve bien dimensionnée,
- est inférieur à 1 pour une chaussée sous-dimensionnée,
- est supérieur à 1 pour une chaussée sur-dimensionnée.

■ Évolution naturelle d'une chaussée en service

> Évolution de la note patrimoine avec l'indice structurel

Lorsqu'une structure de chaussée se détériore, son taux d'endommagement interne croît. Cela correspond, concrètement, au développement de phénomènes physiques ou chimiques internes complexes, hétérogènes, très variables d'un type de chaussée à un autre, et généralement non accessibles à la mesure. À terme, ces détériorations se manifestent par l'apparition en surface de fissurations et de déformations qui, elles, sont accessibles à l'observation. En outre, sur les chaussées semi-rigides, les fissures transversales s'épaussent. Parce qu'elles sont mesurables et liées à l'endommagement, ces dégradations sont à la base de la note « patrimoine » de l'IQRN [2] (cf. ci-dessus).

On pose comme hypothèse que :

H1 : L'évolution de la note patrimoine d'une chaussée suite à sa construction, à son entretien ou à sa réhabilitation, est directement liée à la valeur de son indice structurel juste après ces travaux (qui traduit ainsi la robustesse que ces travaux ont conféré à la structure).

Pratiquement, lorsque l'indice structurel vaut 1, c'est-à-dire dans le cas d'une chaussée neuve normalement dimensionnée, la note patrimoine évolue avec une période de mi-évolution dite « nominale », A_{nom} , qui est liée aux hypothèses de dimensionnement. Si cet indice est inférieur à 1, la chaussée évolue plus vite, son âge de mi-évolution est plus faible, et inversement. On pose donc que l'âge de mi-évolution d'une chaussée est donné par l'équation :

$$A = \bar{I}^{-b} \cdot A_{nom} \quad (8)$$

L'exposant b qui s'applique à l'indice structurel permet de lier l'écart type des valeurs d'indice – donc des valeurs d'épaisseur de l'assise en raison de l'équation (7) – à celui des âges de mi-évolution. On a pu observer que les âges de mi-évolution sont répartis selon une loi Log-normale retournée, aussi on considère l'écart type du logarithme de ces valeurs plutôt que celui des âges eux-mêmes. On pose ainsi :

$$b \cdot \frac{\delta \bar{I}}{\bar{I}} = \frac{\delta A}{A} = \delta [\ln(A)] \quad (9)$$

Les équations (4) et (8) conduisent à proposer, pour l'évolution de la note patrimoine, l'équation :

$$N(t) = 20 + (N_{min} - 20) \cdot \frac{t^p}{\left(\bar{I}^{-b} \cdot A_{nom} \right)^p + t^p} \quad (10)$$

dans laquelle le facteur de forme est également dépendant de l'âge de mi-évolution, donc de l'indice structurel, à travers la relation déduite de (5) :

$$p = \left(\frac{A - \beta}{\alpha} \right) = \left(\frac{\bar{I}^{-b} \cdot A_{nom} - \beta}{\alpha} \right) \quad (11)$$

› Évolution de l'indice structurel avec la note patrimoine

De par son principe de calcul, la note patrimoine varie dans le sens opposé de l'épaisseur de béton bitumineux qu'il faudrait rajouter sur la chaussée en l'état pour remettre sa structure à l'état neuf (cf. ci-dessus). En première approximation, on a :

$$h_{corr} = 1,4 \cdot (20 - N) \quad (12)$$

où h_{corr} est l'épaisseur, exprimée en centimètres, à rajouter pour revenir à l'état neuf, c'est-à-dire à une note patrimoine égale à 20 et à un indice structurel égal à sa valeur à neuf, \bar{I} . Ainsi, aussi longtemps que la chaussée n'a pas reçu de travaux d'entretien/réhabilitation, la valeur de l'indice structurel $I(t)$ d'une chaussée dégradée peut donc être évaluée par l'équation :

$$I(t) = \frac{\bar{h}_e - h_{corr}(t)}{\bar{h}_{e0}} = \frac{\bar{h}_e - 1,4 \cdot (20 - N(t))}{\bar{h}_{e0}} = \bar{I} - 1,4 \cdot \frac{20 - N(t)}{\bar{h}_{e0}} \quad (13)$$

Ce raisonnement revient, en fait, à faire l'hypothèse selon laquelle, en l'absence d'autres informations, on peut estimer l'évolution de l'état de la structure par un examen de sa surface si on connaît son historique.

■ Effet des travaux d'entretien

Lorsqu'on ajoute une ou des couche(s) à une chaussée dont l'indice structurel avant travaux vaut I_q , et en supposant qu'il ne s'agit que d'entretien, c'est-à-dire que l'objectif de trafic n'a pas changé, on accroît plus ou moins sa capacité structurelle. L'effet des travaux revêt deux aspects : l'effet immédiat, qui se traduit par un changement instantané de la valeur de l'indice structurel, et l'effet différé, qui se manifeste par un changement de l'évolution de cette valeur.

> Effet immédiat

Pour quantifier l'effet immédiat, c'est-à-dire l'accroissement de I_q consécutif aux travaux, on calcule d'abord l'épaisseur équivalente de la chaussée dans l'état où elle se trouvait juste avant travaux, par la formule déduite de (7) :

$$h_e = I \cdot \overline{h_{e0}} \quad (14)$$

On calcule ensuite l'épaisseur équivalente de la chaussée rechargée par la formule :

$$h'_e = h_e + \sum_s h_s \cdot \left(\frac{E_s}{5400} \right)^{1/3} \quad (15)$$

dans laquelle h_s et E_s sont respectivement les épaisseurs et les modules des couches rajoutées. L'indice structurel est alors recalculé par la formule (7) dans laquelle $\overline{h_{e0}}$ n'a pas varié et il vient donc :

$$\delta I = \frac{h'_e - h_e}{\overline{h_{e0}}} = \frac{1}{\overline{h_{e0}}} \sum_s h_s \cdot \left(\frac{E_s}{5400} \right)^{1/3} \quad (16)$$

> Effet différé

L'évolution de l'indice structurel après les travaux est déterminée selon une procédure qui s'inspire de celle employée avant les travaux (cf. ci-dessus). Si l'on suppose qu'à la suite des travaux :

- l'indice structurel a pris la valeur $\overline{I'}$;
- la note patrimoine IQRN est devenue N' (il arrive que N' ne soit pas égale à 20, par exemple si on recouvre une chaussée déformée par un enduit superficiel) ;
- l'épaisseur équivalente de la chaussée bien dimensionnée, $\overline{h_{e0}}$, n'a pas varié (même portance de la plate-forme, même trafic).

La note patrimoine varie alors, après les travaux, selon l'équation :

$$N(t) = N' + (N_{\min} - N') \cdot \frac{t^{p'}}{\left(\overline{I'}^b \cdot A_{\text{nom}} \right)^{p'} + t^{p'}} \quad (17)$$

où t est le temps écoulé depuis les travaux et p' la valeur associée à $\overline{I'}$ à travers la relation (11). L'indice structurel évolue ensuite selon une équation déduite de (13) :

$$I(t) = \overline{I'} - 1,4 \cdot \frac{N' - N(t)}{\overline{h_{e0}}} \quad (18)$$

■ Estimation de l'indice structurel à partir d'un relevé

Dans la réalité, on ne suit pas toutes les sections de chaussée depuis leur construction. Bien souvent même, on ne dispose pas de leur « historique », c'est-à-dire de leur date de construction et de la liste des entretiens qu'elles ont reçus. Il faut donc, au moment où on entame un processus de simulation

de l'application d'une stratégie d'entretien, être capable d'estimer la valeur de l'indice structurel initial, \bar{I} , de la chaussée en place. Pour cela, on utilise l'équation (10), en considérant que la note patrimoine initiale valait 20 et que l'âge nominal de mi-évolution, A_{nom} est celui de la structure normalement dimensionnée pour le trafic considéré.

$$\bar{I}^b = \frac{t}{A_{\text{nom}}} \cdot p \sqrt{\frac{N - N_{\text{min}}}{20 - N}} \quad (19)$$

Le facteur de forme p dépendant de \bar{I} selon la relation (11), la résolution de (19) ne peut être qu'itérative mais ne soulève pas de difficultés particulières.

■ Application à l'exemple « fil rouge »

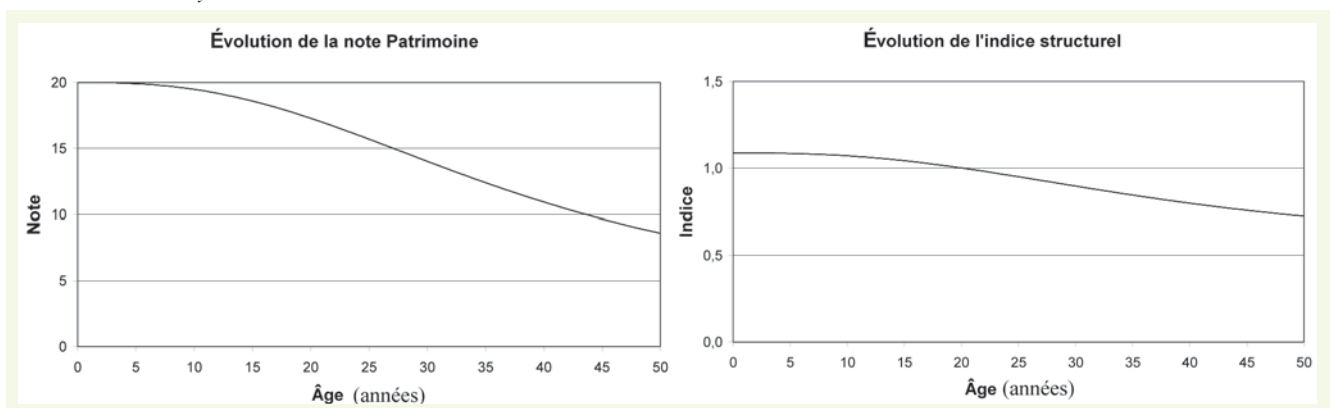
On considère les chaussées bitumineuses épaisses dimensionnées pour un trafic T0. Le catalogue de 1988 propose pour une plate-forme moyenne PF2, la structure suivante : 8 cm de BB, 16 cm de GB, 16 cm de GB [7]. L'épaisseur équivalente d'une telle structure ramenée à une couche de béton bitumineux est, d'après (6), égale à 46,4 cm. La note patrimoine de la chaussée neuve, correctement dimensionnée est, par définition, égale à 20 et son indice structurel vaut théoriquement 1. En réalité, si on analysait le comportement d'un ensemble de sections réelles neuves – qui n'ont pas encore été entretenues – et correctement dimensionnées, on observerait une certaine dispersion de l'indice structurel autour de 1, dispersion due aux aléas de construction et d'exploitation.

Dans le cas présent, la population soumise à l'analyse (cf. ci-dessus) comporte aussi bien des sections qui n'ont pas reçu d'entretien que des sections ayant fait l'objet d'un, deux voire trois entretiens. À ce stade, il est donc nécessaire de faire une hypothèse pour relier l'indice structurel médian de la population observée à celui d'une population de sections non entretenues. L'hypothèse peut paraître totalement arbitraire : elle sera justifiée *a posteriori* dans le paragraphe suivant (elle est, en fait, le fruit d'une approche itérative).

H2 : La section médiane de la population observée, qui comporte une part de sections entretenues une, deux ou trois fois, présente, de ce fait, un indice structurel supérieur de 9 % à celui d'une section normalement dimensionnée (c'est-à-dire $I = 1$).

L'analyse assez exhaustive menée sur les 21 655 sections de la population observée montre que la section médiane de cette population se dégrade avec un âge de mi-évolution $A_{\text{nom}} = 38$ ans. D'après (5), le coefficient de forme, p , de l'équation de la courbe d'évolution vaut 2,6. L'exposant b de l'indice structurel, dans cette équation, est obtenu en remarquant qu'on admet, sur l'épaisseur des couches en enrobé, une incertitude de l'ordre de 15 % [7] et que l'écart type sur le logarithme des âges de mi-évolution de la population étudiée est égal à 0,42 soit $b = 2,8$. Les graphiques de la figure 4 montrent l'évolution de la note patrimoine et de l'indice structurel de ce type de section sur une période de 50 ans.

figure 4
Évolution d'une section médiane de la population analysée.



On réalise mieux combien cette chaussée est robuste, en constatant que son indice structurel n'est réduit que de 28 % au bout de 50 ans. Toujours d'un point de vue structurel, il suffit de rajouter 4 cm de BB sur cette section au bout de 20 ans pour que la chaussée retrouve à cet âge tout son potentiel (figure 5).

figure 5

Entretien structurel au bout de 20 ans (4 BB).

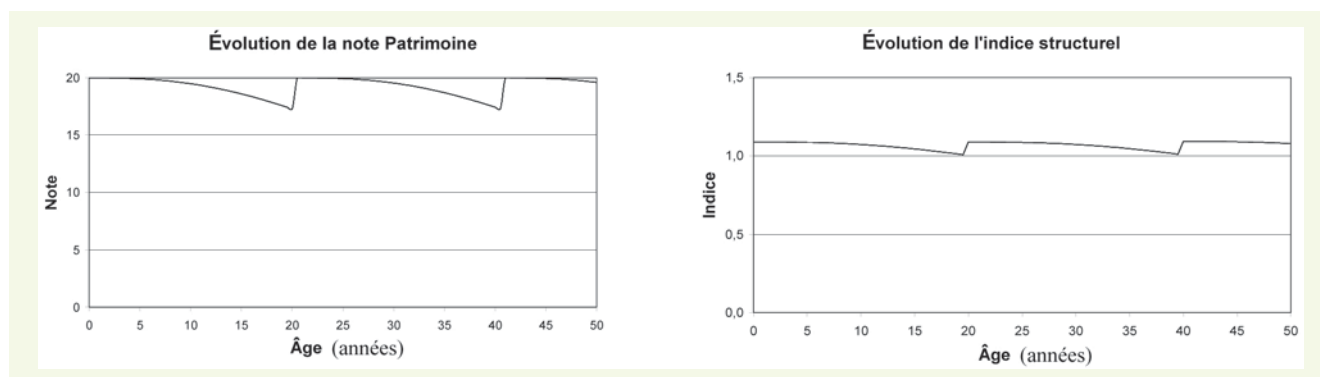
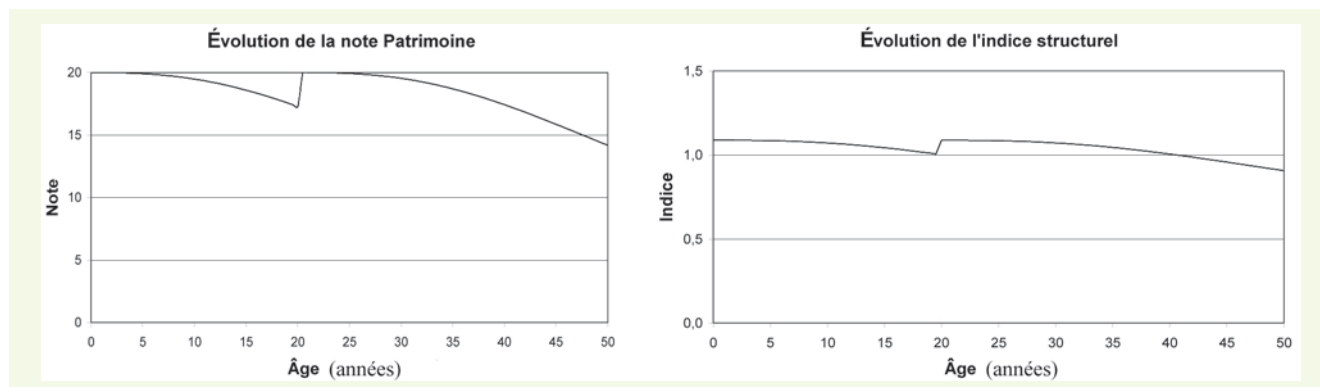


figure 6

Stratégie d'entretien structurel = 4 cm de BB tous les 20 ans.

RAPPROCHEMENT ENTRE HYPOTHÈSES DE DIMENSIONNEMENT ET COMPORTEMENT OBSERVÉ

Pour construire l'indice structurel et l'exploiter, il a été nécessaire de poser l'hypothèse H2 d'après laquelle : « La section médiane de la population observée présente un indice structurel supérieur de 9 % à celui d'une section normalement dimensionnée ». Il devient possible, à ce stade, de justifier cette hypothèse.

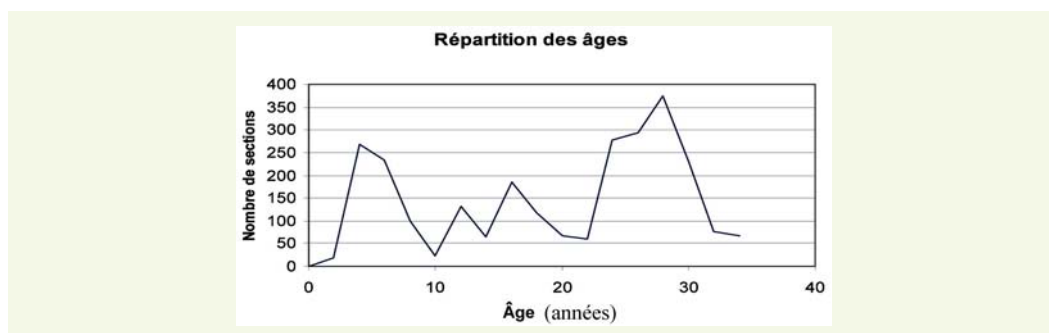
Dans le cadre d'une étude menée en parallèle [8], on dispose d'un historique complet des travaux de construction et d'entretien sur 2 589 sections appartenant à la population analysée ci-dessus. La figure 7 présente la distribution des âges de ces sections.

Les sections les plus anciennes et les plus nombreuses correspondent aux renforcements coordonnés exécutés sur le réseau routier national durant les années 1970. Après une période d'investissements plus faibles, on observe une reprise des investissements entre 1998 et 2000, probablement consécutive à la mise en place du programme de réhabilitation.

L'analyse de ces sections permet de préciser les caractéristiques des entretiens :

- aucun entretien : concerne 651 sections (25,2 %) dont la moyenne d'âge est de 6,7 ans ;

figure 7
Distribution des âges des
2 589 sections dont les
structures sont connues.



- 1^{er} entretien : concerne 1 938 sections et consiste en 4,1 cm de BB au bout de 11,6 ans en moyenne ; 816 sections (31,5 %) n'ont reçu qu'un seul entretien ;
- 2^e entretien : concerne 1 122 sections et consiste en 4,3 cm de BB au bout de 8,3 ans en moyenne ; 925 sections (35,7 %) ont reçu deux entretiens ;
- 3^e entretien : concerne 197 sections et consiste en 6,3 cm de BB au bout de 5,8 ans en moyenne ; ces sections (7,6 %) ont reçu trois entretiens.

Il est possible de simuler l'application d'une séquence d'entretien composée de ces trois interventions aux âges et avec les épaisseurs moyennes indiquées ci-dessus. La **figure 8** présente l'effet de cette séquence sur l'indice structurel d'une section normalement dimensionnée au départ. Les interventions font plus que compenser la perte de qualité structurelle, puisque l'indice s'élève à 1,03 après le premier entretien, à 1,10 après le second et à 1,24 après le troisième.

Si on admet que l'échantillon réduit est suffisamment représentatif de la population analysée, notamment en termes de proportion de sections ayant reçu 0, 1, 2 ou 3 entretiens, et compte tenu du résultat ci-dessus, on peut estimer la minoration à appliquer à l'indice structurel déduit des observations faites sur les 21 655 sections de la population complète pour obtenir celui qui s'appliquerait aux chaussées non entretenues, on applique la formule :

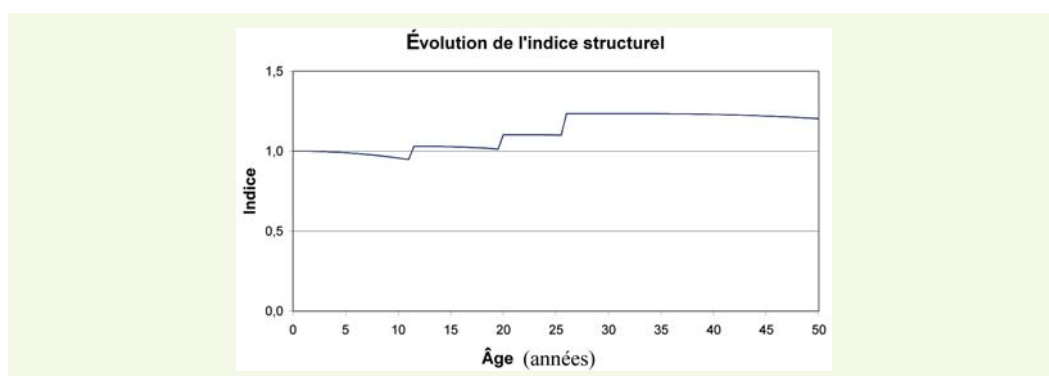
$$\bar{\delta I} = \frac{\sum_{i=1}^3 P_i \cdot \bar{\delta I}_i}{\sum_{i=1}^3 P_i} \quad (20)$$

où $\bar{\delta I}_i$ est le gain d'indice consécutif à i entretiens ;

P_i est la probabilité que la section ait subit 1, 2 ou 3 entretiens.

Il apparaît alors que l'indice structurel médian de la population analysée diffère de celui d'une population composée exclusivement de sections non entretenues d'un peu moins de 9 %. Ainsi se trouve justifiée l'hypothèse H2.

figure 8
Effet, sur l'indice
structurel, de la séquence
d'entretien appliqué sur
l'échantillon de sections.



APPLICATION DE L'INDICE STRUCTUREL À L'ÉTUDE DE STRATÉGIES D'ENTRETIEN

L'un des premiers intérêts de l'indice structurel est de permettre une modélisation plus fidèle du comportement des chaussées et de l'effet des travaux d'entretien. Quelques exemples illustrent ci-dessous cet intérêt.

La **figure 9** présente l'évolution de la note patrimoine et de l'indice structurel d'une chaussée correctement dimensionnée. La note patrimoine décroît avec un âge de mi-évolution de 30 ans.

Une stratégie d'entretien régulière et pertinente (au plan structurel) consiste par exemple à mettre en place une couche de 4 cm tous les 15 ans, comme le montre la **figure 10**.

figure 9
Évolution d'une chaussée correctement dimensionnée.

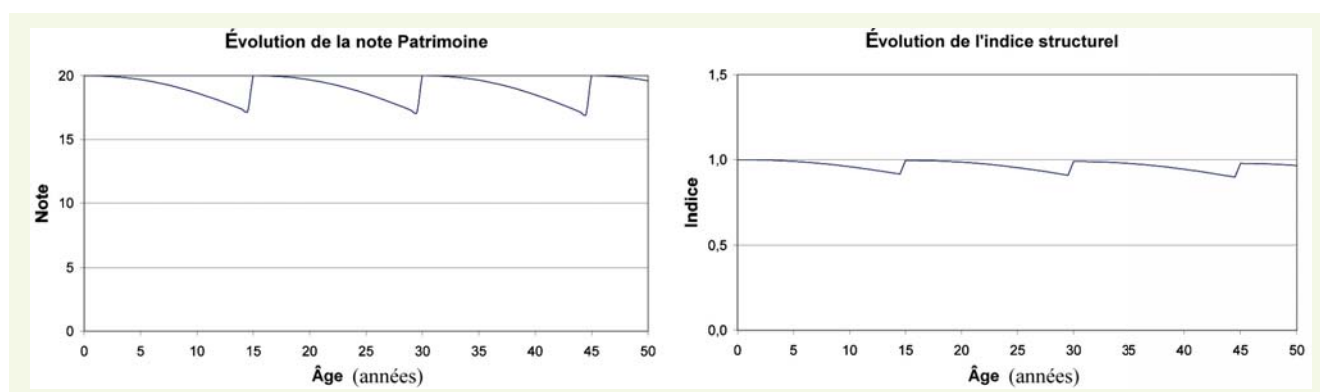
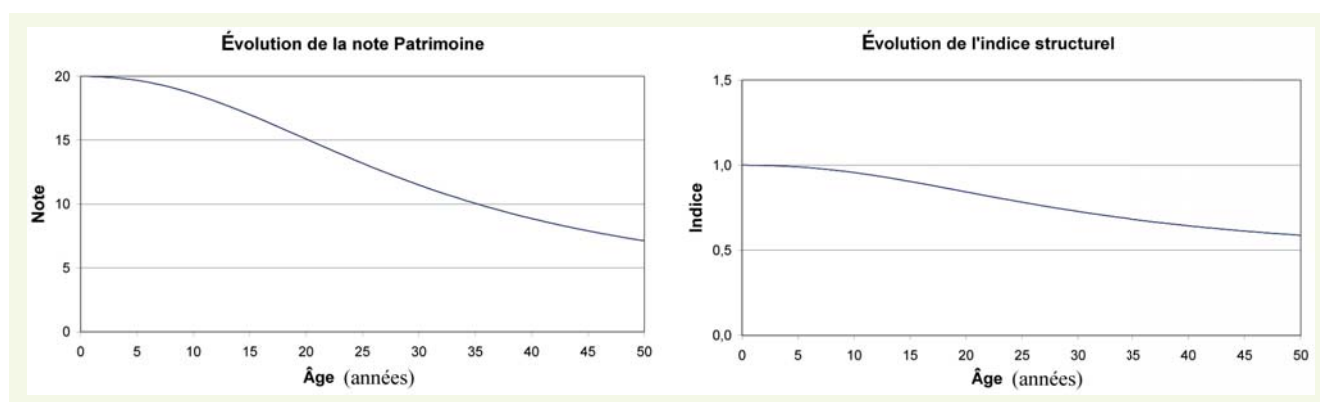


figure 10
Entretien périodique d'une chaussée bien dimensionnée (4 BB tous les 15 ans).

Considérons maintenant une chaussée sous-dimensionnée dont l'indice structurel initial vaut par exemple 0,8. La note patrimoine décroît plus vite, avec un âge de mi-évolution de 16 ans. De même, la chute de l'indice structurel est rapide. Pour maintenir la chaussée à son niveau structurel initial (toujours sous-dimensionné à $I = 0,8$), il faut appliquer 7 à 8 cm de BB tous les 10 ans. On peut parvenir au même résultat avec une stratégie de 11 à 12 cm tous les 15 ans. La **figure 11** illustre cette seconde stratégie.

Si on imagine maintenant que cette structure de chaussée se dégrade essentiellement par fissuration de fatigue – ce qui est très plausible sur une structure GB – un enduit superficiel à 15 ans suffit alors à faire disparaître les fissures, donc à ramener la note patrimoine à 20 et à redonner – apparemment – à la chaussée son état neuf. Mais qu'en est-il en réalité ? La **figure 12** permet de répondre à cette question, en montrant que l'indice structurel reste faible, ce qui entraîne une évolution plus rapide de la note patrimoine après ces travaux, montrant ainsi que ceux-ci étaient inappropriés. Il faudra alors renforcer la chaussée, 5 ans plus tard, par 20 cm de BB, pour retrouver sa capacité structurelle initiale ($\bar{I} = 0,8$) et pouvoir reprendre ensuite les entretiens de 12 cm de BB tous les 15 ans.

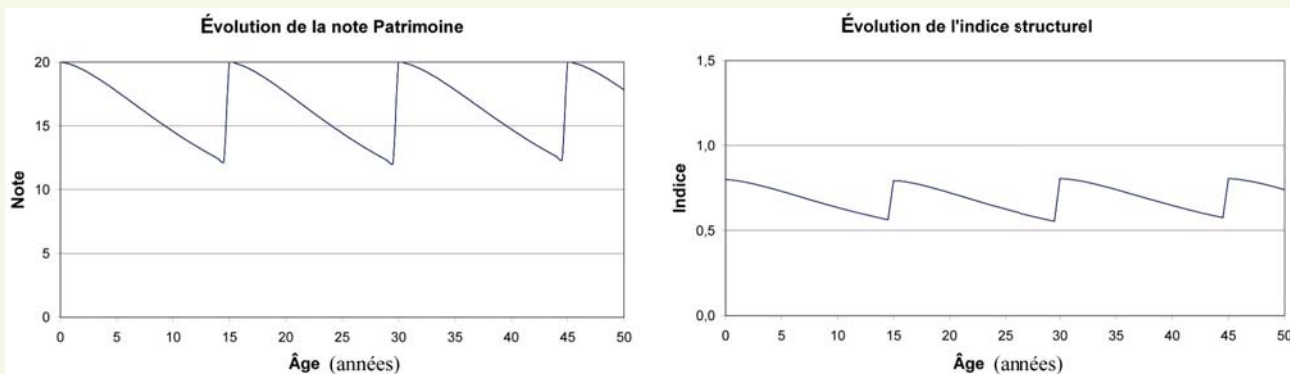
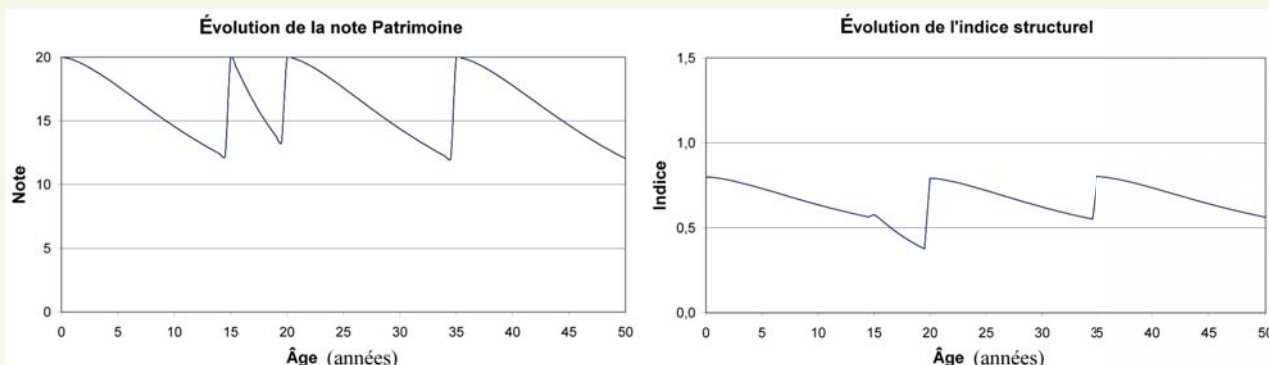


figure 11

Stratégie d'entretien
périodique sur une
chaussée sous-
dimensionnée
(11 à 12 cm de BB tous les
15 ans).

figure 12

Exécution d'un entretien
inapproprié (ES) à 15 ans
et correction (20 BB) à
20 ans.



On peut imaginer de nombreuses autres simulations. Le recours à l'indice structurel permet donc d'étudier différentes stratégies d'entretien et d'évaluer de façon plus réaliste leur véritable effet structurel en s'affranchissant en bonne partie des limites reconnues de la note structurelle (la note patrimoine) de l'IQRN.

APPLICATION DE L'INDICE STRUCTUREL À L'ÉTUDE DE LA VALEUR D'UNE CHAUSSEE

■ Éléments d'analyse technico-économique

Dans ce qui suit, il ne sera question que de la valeur de la chaussée, définie comme celle de l'ensemble des couches mises en place sur la plate-forme. Cette valeur n'est donc pas celle de la route, dont elle diffère notamment par le coût des acquisitions de terrain, des terrassements – couche de forme comprise – des assainissements, etc. Toutefois, ainsi définie, la valeur de la chaussée permet d'évaluer plus correctement l'impact financier des opérations d'entretien et de réhabilitation.

La valeur de la chaussée neuve, C_{neuf} , est égale à la somme des coûts de matériaux et de mise en œuvre des couches de fondation, de base et de roulement de la chaussée initiale. La valeur résiduelle de la chaussée à un instant donnée est définie comme la valeur à neuf de la chaussée diminuée de la valeur des travaux qu'il faudrait y réaliser pour la remettre à neuf, compte tenu de son état de dégradation. D'après (14), ceci se traduit par l'équation :

$$C_{\text{res}} = C_{\text{neuf}} - \overline{h_{e0}} \cdot [\bar{I} - I(t)] \cdot C_{\text{BB}} \quad (21)$$

où \bar{I} est la valeur de l'indice structurel de la chaussée à sa construction, $I(t)$ sa valeur à l'instant t , $\overline{h_{e0}}$ l'épaisseur équivalente de la chaussée dans sa famille et C_{BB} le coût d'une couche de béton

bitumineux d'un centimètre d'épaisseur. Bien entendu, les termes C_{res} , C_{neuf} et C_{BB} doivent être actualisés (cf. ci-dessous) au même instant.

Dès lors que ce concept de valeur résiduelle est défini et calculable, on peut réaliser des comparaisons financières, voire économiques, de différentes stratégies de construction et d'entretien. Pour cela, on calcule la somme des dépenses et des « pertes » (valeur initiale – valeur résiduelle) liées à l'application de chacune de ces stratégies, actualisée à la date de construction de la chaussée, en appliquant la formule [9] :

$$B_a = V_{neuf} + \sum_{t=0}^{t=n} \{F_{i,t} [CR_t + CE_t]\} - F_{i,n} V_{res} \quad (22)$$

où :

B_a : bilan global de la construction et de l'entretien de l'infrastructure, actualisé à l'année 0 ;

V_{neuf} : coût de construction à l'année 0 ;

CR_t : coût de réhabilitation à l'année t ;

CE_t : coût d'entretien à l'année t ;

V_{res} : 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 :

$$F_{i,t} = \frac{1}{(1+i)^t} \quad (23)$$

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

- soit le retour sur investissement vrai, lorsqu'on s'intéresse aux infrastructures gérées par le secteur privé (égal à l'écart entre le rendement escompté par l'investisseur et l'inflation),
- soit une forme de « préférence temporelle » du maître d'ouvrage lorsque celui-ci est public (4 % pour l'État au milieu des années 2000 [10]).

On notera que cette approche est restreinte aux coûts directs supportés par le gestionnaire de la route. En particulier, elle n'intègre pas les autres coûts d'exploitation, tels que les coûts d'usage et les coûts environnementaux. Une optimisation réelle de l'entretien routier doit prendre en compte, sous une forme ou une autre, ces différents coûts.

■ Exemple

En considérant un taux d'actualisation de $i = 4\%$ et un coût de béton bitumineux de 3 000 UC¹/m³, on peut calculer la valeur résiduelle au bout de 50 ans, actualisée à l'année de construction, d'une chaussée. En l'occurrence :

- une chaussée normalement dimensionnée – pour laquelle on a donc $\bar{I} = 1$ – a une valeur initiale de 1 391 UC/m² ; sa valeur résiduelle, si aucun entretien n'est appliqué, est de 120 UC/m² ;
- une chaussée qui aurait, par exemple, une note de 13 à l'âge de 10 ans – et donc un indice structural initial de 0,74 – a une valeur initiale de 1 029 UC/m² et une valeur résiduelle de 57 UC/m².

¹ Les valeurs sont chiffrées en unités de compte (UC). Ceci permet de s'affranchir des variations locales ou, dans le temps, des coûts de construction et d'entretien. On peut toutefois prendre en première approche 1 UC ~ 1 €.

On constate que la valeur résiduelle, évaluée au terme d'une période longue, n'a que peu d'impact sur le bilan économique. Si on considère maintenant une chaussée dont l'indice structurel initial est de 0,8 et qu'on lui applique un entretien périodique de 11 à 12 cm de béton bitumineux tous les 15 ans (*cf. figure 11*), le bilan actualisé de cet entretien vaut $B_a = 1\,319 \text{ UC/m}^2$. Une autre stratégie consiste à appliquer 16 cm de béton bitumineux tous les 25 ans. Dans ce cas, le bilan actualisé sur 50 ans se monte à $1\,228 \text{ UC/m}^2$. Enfin, une stratégie de type « aucun entretien pendant 50 ans, puis reconstruction à l'issue de la période », présente un bilan actualisé $B_a = 1\,047 \text{ UC/m}^2$. C'est donc apparemment cette dernière stratégie qui est la plus rentable. Ces conclusions résultent principalement du fait qu'on ne prend pas en compte les coûts d'usage et d'environnement.

L'indice structurel permet également d'étudier l'intérêt d'une stratégie d'entretien progressif. La chaussée étudiée ci-dessus ($I = 0,8$) peut avoir été sous-dimensionnée volontairement. On ramènera progressivement son niveau structurel à un dimensionnement correct en exécutant des entretiens légèrement plus épais que ceux nécessaires au strict maintien de sa qualité structurelle initiale. Dans ce but, on pourra mettre en œuvre des couches de 13 cm de BB tous les 15 ans. Le bilan actualisé d'une telle stratégie de construction/entretien est de $1\,317 \text{ UC/m}^2$ et est donc un peu plus favorable que le bilan actualisé de la stratégie s'appliquant à une chaussée normalement dimensionnée dès sa construction (qui s'élève à $1\,326 \text{ UC/m}^2$).

Sans tirer de conclusions hâtives à partir de ces quelques exemples, on peut toutefois noter que l'indice structurel apporte un outil très efficace pour conduire ce type d'analyses technico-économiques.

CONCLUSIONS

En analysant les notes structurelles recueillies depuis plus de 10 ans sur les chaussées du réseau routier national français (RRN), dans le cadre des opérations IQRN, on peut opérer un rapprochement entre le dimensionnement et l'entretien des chaussées modernes et leur comportement à moyen et long terme, tel qu'observé en site.

On a examiné la possibilité de définir un indice structurel par le rapport entre l'épaisseur équivalente de la chaussée en l'état et celle de la chaussée correctement dimensionnée au sens de la méthode française de conception. En s'appuyant sur la méthode d'évaluation structurelle développée pour l'opération IQRN, on peut proposer un mode d'estimation de l'épaisseur équivalente des chaussées en fonction de leur état structurel apparent, caractérisé par la note patrimoine de l'IQRN. L'impact des travaux d'entretien sur l'indice structurel est aisément calculable et dépend de l'épaisseur des dits travaux.

Un exemple, bâti sur les données résultant du suivi des chaussées bitumineuses épaisses (structure en grave bitume) sur le RRN, montre que cet indice permet de beaucoup mieux caractériser l'évolution structurelle des chaussées et l'effet des travaux d'entretien. Il ouvre donc la possibilité d'effectuer des comparaisons beaucoup plus pertinentes entre stratégies d'entretien, et de prévoir de façon plus fiable l'impact à moyen et long termes d'une politique d'entretien. Cet indice constitue également un outil très appréciable pour évaluer et comparer des scénarios d'entretien – construction au plan économique.

Une analyse plus systématique des données IQRN devrait permettre d'étendre l'application de cet indice à d'autres familles de chaussée (autres types de structure, autres niveaux de trafic). Enfin, il serait intéressant d'étudier les relations entre cet indice et les paramètres décrivant la rigidité de la structure, tels que ceux extraits de la mesure des bassins de déflexion [11]. Bien que la déflexion maximale soit de moins en moins utilisée pour le suivi de l'état structurel des chaussées, essentiellement parce qu'elle n'est sensible aux détériorations structurelles qu'à un stade très avancé [12], ce rapprochement pourrait apporter de nouvelles connaissances.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 LEPERT PH., JOUBERT P., Recent developments in the PMS in France, *4th International Conference on Managing Pavement*, Durban, **1998**, vol. 1.
- 2 LEPERT PH., GOUX M.-T., Évaluation du réseau français de routes nationales basée sur le relevé de dégradations de surface, *4^e Congrès International de la route*, Rabat, 2 juin **1994**.
- 3 RÊCHE M., *Effet des travaux d'entretien sur les lois d'évolution des dégradations de chaussées* Thèse de doctorat, Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand, novembre **2004**.
- 4 LEPERT PH., SAVARD Y., LEROUX D., RÊCHE M., Méthodes statistiques de prévision de l'évolution des chaussées, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **250-251**, **2004**.
- 5 LORINO T., LEPERT PH., 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**.
- 6 ULLIDTZ P., *Pavement analysis*, Elsevier, **1987**.
- 7 CORTÉ J.-F. et al., *Conception et dimensionnement des structures de chaussées – Guide technique*, LCPC – SETRA, décembre **1994**.
- 8 BRILLET F., LORINO T., DUMEIX T., Analyse des séquences d'entretien des routes en fonction de l'évolution des dégradations, *International Conference on Asphalt Pavements (ICAP)*, Québec, août **2006**.
- 9 LEPERT PH., Gestion technico-économique des infrastructures routières, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **261-262**, **2006**.
- 10 LEBEGUE D. et al., *Révision du taux d'actualisation des investissements publics*, Commissariat Général au Plan, janvier **2005**.
- 11 SIMONIN J.-M. et al., *Études routières – Déformabilité de surface des chaussées – Exécution et exploitation des mesures*, coll. Techniques et méthodes des LPC, avril **1997**.
- 12 LEPERT PH., Évolution de la déflexion observée sur les chaussées souples modernes, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **265**, **2006**.

ANNEXE : APPLICATION DE LA MÉTHODE DÉRIVÉE DE LA THÉORIE DES LOIS DE SURVIE

La méthode dérivée de la théorie dite « des lois de survie » a été proposée par Emmanuel Courilleau, dans le cadre d'une thèse [9] réalisée au sein du LCPC de 1994 à 1997. Elle a été complétée par Michel Rèche en 2004 [3]. En règle générale, elle ne nécessite aucun *a priori* concernant la forme du modèle. Dans cette méthode, il y a identité entre les notions de section et d'observation puisque chaque observation est réputée provenir d'une section indépendante.

■ Principe général

Le principe fondamental mis en œuvre par la méthode consiste à exprimer que, parmi tous les modèles d'évolution possible pour une variable, celui qu'il faut retenir est celui qui rend le plus probable les observations réalisées.

Dans le cas qui nous intéresse (évolution d'une note entre 20 et N_{\min}), l'âge, T_η , auquel l'indicateur franchit une note donnée, η , est assimilé à une variable aléatoire, pour laquelle on pose *a priori* une loi de probabilité, paramétrée par certains coefficients, loi dont la fonction de répartition F_{T_η} peut être écrite sous la forme :

$$F_{T_\eta}(t) = \Pr[T_\eta < t] = 1 - S_{T_\eta}(t) \quad (\text{A1})$$

où S_{T_η} est la fonction de survie de la variable aléatoire T_η . L'objectif de la méthode est d'identifier la loi de probabilité et les valeurs de coefficients qui s'accordent le mieux aux observations disponibles dans la base de données. On utilise pour cela la « méthode du maximum de vraisemblance » (MMV). On calcule, à partir de la loi de probabilité posée *a priori*, la probabilité l_i pour que ce qui a été observé sur la section i , concernant le franchissement du seuil donné η , se soit réalisé. Selon la section, deux cas peuvent se présenter :

1. $N_i < \eta$, c'est-à-dire que la note N_i de la section n° i a déjà franchi le seuil η à l'instant d'observation t_i . Alors, la probabilité que le modèle accorde à la proposition « À l'instant t_i , la note N_i est inférieure à η » doit être la plus élevée possible. Les notes évoluant de façon uniformément décroissante, cette proposition est équivalente à la suivante : « L'instant t_i est supérieur à la valeur T_η ». Ceci se traduit mathématiquement par le fait que la quantité l_i est maximale, avec :

$$l_i = \Pr[T_\eta < t_i] = F_{T_\eta}(t_i) \quad (\text{A2})$$

2. $N_i > \eta$, c'est-à-dire que la note N_i de la section n° i n'a pas encore franchi le seuil η à l'instant d'observation t_i . Alors, la probabilité que le modèle accorde à la proposition « À l'instant t_i , la note N_i est supérieure à η » doit être la plus élevée possible. Les notes évoluant de façon uniformément décroissante, cette proposition est équivalente à la suivante : « L'instant t_i est inférieur à la valeur T_η ». Ceci se traduit mathématiquement par le fait que la quantité l_i est maximale, avec :

$$l_i = \Pr[T_\eta > t_i] = 1 - F_{T_\eta}(t_i) \quad (\text{A3})$$

La quantité l_i est appelée la vraisemblance accordée par le modèle à l'observation n° i . Le meilleur modèle est celui qui maximalise les vraisemblances sur l'ensemble des observations, c'est-à-dire celui qui rend maximale la quantité :

$$L = \prod_{i=1,K} l_i \quad (\text{A4})$$

ou encore la quantité, plus facile à manipuler :

$$\text{Ln}(L) = \sum_{i=1,K} \text{Ln}(l_i) \quad (\text{A5})$$

où K est la taille de l'échantillon. La MMV consiste donc à prendre les valeurs qui rendent maximale cette vraisemblance globale comme estimateurs des coefficients de la loi. La recherche de ces estimateurs est effectuée par une technique itérative (Newton – Raphson). L'approche est répétée pour différentes formes et coefficients de loi de probabilité, ceux qui rendent maximale la vraisemblance globale étant adoptés. Cette analyse est répétée, à son tour, pour les différents seuils d'évolution (les différentes valeurs de note) effectivement franchis dans la base de données, et produit un abaque tel que celui de la **figure A1**.

Pour déterminer la loi d'évolution d'une section particulière à partir de l'abaque caractérisant le modèle de comportement d'une famille, on est amené à faire une hypothèse selon laquelle si, à un âge donné, une section S donnée a évolué plus rapidement que X autres sections présentant les mêmes valeurs de variables explicatives, cette section évoluera toujours plus rapidement que ces X autres sections. La traduction concrète de cette hypothèse, c'est que l'évolution d'une section donnée, représentée par une observation, qui est elle-même caractérisée par un point sur le diagramme de la **figure A1**, se fera en suivant une ligne horizontale de gauche à droite sur ce diagramme.

■ Application à l'exemple « fil rouge »

La **figure A1** présente quelques-unes des courbes de répartition par note des sections de l'échantillon « fil rouge » décrit dans l'article. En fait, chacune de ces courbes traduit la probabilité (en ordonnée) qu'une section ait franchi une note donnée à un âge donné (en abscisse). Sur cet abaque, le chemin que suit une section donnée lorsqu'elle vieillit est représenté par une droite horizontale dont l'ordonnée dépend de la « robustesse » de la section. Ainsi, sur la **figure A1**, la flèche horizontale en pointillés représente le chemin suivi par une section médiane de la population (c'est-à-dire représentant le quantile 50 %) qui atteint la note.

La **figure A2** représente les courbes d'évolution (traits pleins) de sections fictives qui représentent les différents quantiles de la population (2 %, 5 %, 30 %, 50 % et 60 %), ainsi que les courbes (pointillées) répondant à l'équation (4) et ajustant au mieux ces courbes expérimentales.

figure A1

Courbes de répartition des sections par note.

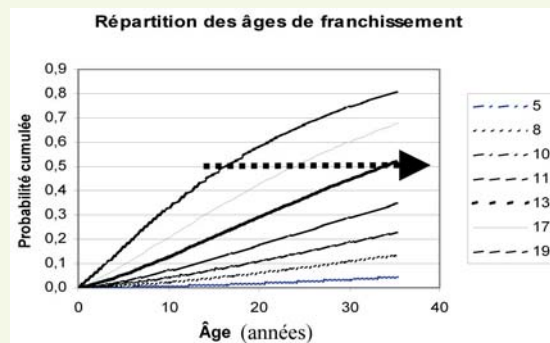
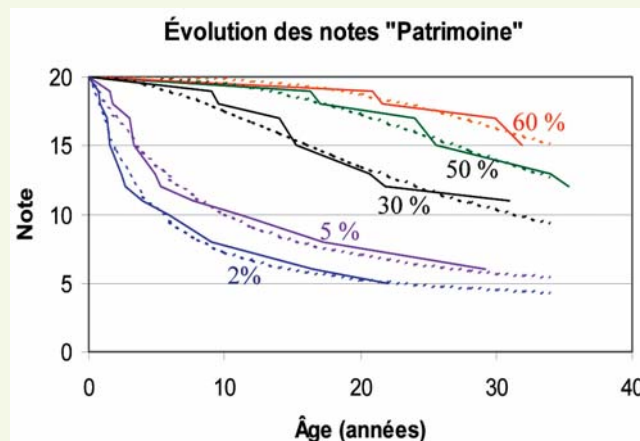


figure A2

Ajustement du modèle (2) sur les résultats de l'analyse faite à l'aide de la méthode des lois de survie.



Le **tableau A1** liste les valeurs des facteurs de forme p et des âges de mi-évolution A de l'équation (4) pour ces différentes courbes.

tableau A1
Coefficient des courbes
de répartition.

Modélisation de p et A		
%	P	A (années)
2	1,15	3,9
5	1,2	7,5
30	1,9	26
50	2,6	38
60	3	46

La **figure A3** montre qu'il existe une relation sensiblement linéaire entre ces deux coefficients, et permet donc de calculer les coefficients α et β de cette équation, pour cette population.

$$A = \alpha \cdot p + \beta \quad (\text{A6})$$

figure A3
Relation entre l'âge de
mi-évolution et le facteur
de forme des sections au
sein de la population.

