

**Fonctions de survie et méthode des M-estimateurs :
application au module *STRATÈGE*
du système français de gestion des chaussées *GiRR***

par

Karine Vernier

Bureau d'économie théorique et appliquée (BETA)
Université Louis Pasteur, Strasbourg

Centre de recherche sur les transports (CRT)
Université de Montréal, Montréal

Service d'études techniques des routes et des autoroutes (SETRA)
Bagneux

Cette étude a bénéficié d'un financement du Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA) du Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et du Tourisme (MELTT) de France et d'une bourse d'excellence du Gouvernement du Canada détenue au Centre de recherche sur les transports (CRT) de l'Université de Montréal. L'auteur remercie Marc Gaudry, Marie-Thérèse Goux et François Laisney de leur encadrement et soutien. Les travaux ont été faits dans le cadre de la convention d'encadrement des travaux de doctorat de Karine Vernier établie entre les parties sous la direction de Marc Gaudry, professeur au département de sciences économiques de l'Université de Montréal, chercheur invité au BETA ainsi que professeur invité à l'Université Louis Pasteur. En 2002, on peut joindre Karine Vernier à : Karine.Vernier@gazdefrance.com.

Agora Jules Dupuit—Publication AJD-56
Centre de recherche sur les transports—Publication CRT-98-58

Novembre 1998. Révisé le 26 janvier 1999 et le 27 août 2002.

Résumé

Le système de gestion des chaussées français repose sur une base de données routière qui représente une photographie globale du réseau de routes nationales en 1993. Le caractère ponctuel de cette base de données a conduit à l'utilisation de la théorie des données de survie pour établir des lois de comportement. L'objet de ce rapport est de présenter la méthode de fiabilisation de ces lois de comportement. La fiabilisation s'est faite par l'estimation d'intervalles de confiance obtenus en appliquant la méthode des M-estimateurs à la différence de fonctions de survies relatives à des états structurels successifs. Cette méthode de fiabilisation est particulièrement appropriée dans ce cadre car elle permet de quantifier les erreurs commises à la fois en temps et en état lors des inférences réalisées. Nous présentons l'application au réseau de routes nationales complet et établissons qu'à l'échelle départementale, les estimations sont associées à une plus grande incertitude. Nous proposons pour finir deux simulations de stratégies d'entretien et observons la mesure dans laquelle les intervalles de confiance permettent d'anticiper les éventuelles erreurs de prévision.

Mots-clés: coupe transversale, entretien des chaussées, intervalles de confiance, fiabilisation, loi de survie, loi d'évolution, modèle de comportement, loi de Weibull, méthode des M-estimateurs, simulation, France, réseau routier.

Abstract

The French pavement management system is based on a cross sectional data base. This data base gives a global picture of the French national road network in 1993. To establish behavioral functions, the theory of survival functions has been used. The aim of this text is to present the methodology for obtaining the reliability of such behavior laws. We evaluate the errors by confidence intervals obtained by the use of the method of M-estimators applied to differences between two successive survival functions. This approach is very usefull in this context because we can quantify the estimation errors on both time and state. We present several applications. It appears that, at the departmental level, the estimates have more uncertainty than those for the national network as a whole. Finally, we analyze two management strategy simulations and study the extent to which confidence intervals make it possible to detect forecast errors.

Keywords: cross sectional data base, confidence intervals, reliability, survival data, evolution law, behavioral model, Weibull distribution, M-estimators method, simulation, France, road network.

Table des matières

	Page
I- Les systèmes de gestion des chaussées: principes.....	1
I.1- Acquisition des données.....	1
I.2- Détermination des lois d'évolution d'états de chaussées.....	2
I.3- Définition et choix des stratégies d'entretien.....	3
I.4- Conclusion.....	3
II- Le système de gestion de l'administration française: La gamme GiRR.....	4
II.1- GiRR ÉVALUÉ.....	4
II.2- GiRR STRATÈGE.....	5
II.3- GiRR PROGRAMME.....	6
II.4- GiRR EXPERT.....	6
III- Fiabilisation de GiRR STRATÈGE.....	6
III.1- Les données utilisées par GiRR-STRATÈGE.....	6
III.2- Méthodologie d'estimation des courbes de survie.....	7
IV- Intervalles de confiance sur les proportions.....	10
V- Résultats et applications.....	12
V.1- Résultats sur le réseau complet.....	12
V.2- Application à des bases de données départementales.....	14
V.2.1- Le département 35.....	14
V.2.2- Le département 31.....	16
V.3- Simulations de stratégies.....	18
V.3.1- Cas d'étude 1.....	18
V.3.2- Cas d'étude 2.....	18
VI- Conclusion.....	20
Références.....	21

Liste des figures

Tableau 1:	Les familles de structure trafic du réseau national	6
Tableau 2:	Extrait du fichier de données	6
Figure 1:	Courbes de survies relatives à la famille de structure GB et au trafic FT pour 4 états de référence	9

Figure 2:	Différence des courbes de survies, réseau GBFT	9
Figure 3:	Courbe d'évolution moyenne et intervalles de confiance, table NTFT	12
Figure 4:	Courbe d'évolution moyenne et intervalles de confiance, table GBFT	12
Figure 5:	Proportion de sections de note 19, table NTFT	13
Figure 6:	Proportion de sections de note 19, table GBFT	13
Figure 7:	Répartition des notes, département 35	14
Figure 8:	Répartition des âges de couche de roulement, département 35	15
Figure 9:	Courbe d'évolution moyenne et intervalles de confiance, département 35	15
Figure 10:	Répartition des notes, département 31	16
Figure 11:	Répartition des âges de couche de roulement, département 31	16
Figure 12:	Courbe d'évolution moyenne et intervalles de confiance, département 31	17
Figure 13:	Simulation de la première stratégie	19
Figure 14:	Simulation de la seconde stratégie	19

Introduction

Les activités de gestion des chaussées sont généralement distinguées en fonction des niveaux administratifs auxquels elles se situent. La *gestion au niveau local* intéresse plutôt les techniciens. Elle consiste à évaluer des niveaux de dégradation et à proposer des solutions d'entretien, intégrées, en général, dans des procédures de programmation annuelle de travaux. La *gestion au niveau du réseau* concerne particulièrement les administrations centrales. Elle permet de réaliser les prévisions budgétaires à moyen ou long terme, compte tenu de l'état global des chaussées. Les grandes orientations techniques et économiques relatives à l'entretien des voiries sont définies dans ce cadre de gestion. Cette activité est une composante essentielle dans le domaine de la gestion de l'entretien. Le cadre de l'entretien traité dans cette étude concerne la gestion au niveau du réseau.

Lorsque les travaux d'entretien sont insuffisants ou mal adaptés, des dégradations apparaissent sur la chaussée tant en profondeur (ou structure) qu'en surface. Quand les dégâts deviennent trop importants, les déplacements sont contraints et limités, et l'usage global de la route est perturbé. Si ces dégradations atteignent des proportions substantielles, des travaux de rénovation majeurs doivent être entrepris pour pallier aux défaillances du réseau d'infrastructures. Cette situation de crise a été vécue par de nombreux pays industrialisés au cours des années 50. Elle a été suivie par une approche différente de l'entretien routier qui vise à maintenir un niveau de service correct, dans la limite des budgets alloués.

I- Les systèmes de gestion des chaussées: principes

Le développement des systèmes de gestion n'est observé que dans quelques pays industrialisés. L'Amérique du nord est la région du monde où les premiers systèmes ont été développés. En Europe, les pays nordiques, le Royaume-Uni et la France ont entamé la construction d'un tel outil au début des années 90. Les pays d'Europe de l'est et nord-africains commencent seulement à s'impliquer dans de tels projets.

Dans chaque pays, les systèmes de gestion proposés sont différents. Cela tient à la spécificité des problèmes et aux objectifs que s'assigne chaque administration routière. Les buts fondamentaux sont pourtant identiques. Les systèmes de gestion de chaussée sont conçus pour fournir un support aux gestionnaires, dans la recherche de solutions à leurs problèmes techniques, économiques et financiers. En règle générale, l'optimisation de la gestion d'un réseau routier (OCDE, 1987) suit quatre étapes.

I.1- Acquisition de données

Chaque pays constitue une base de données routière composée d'indicateurs élémentaires de dégradation. Suivant l'exemple des essais *AASHO* (1962), les administrations routières créent des indices permettant de caractériser de manière globale l'état de la chaussée. Ces indices sont, pratiquement toujours, une agrégation de plusieurs indicateurs élémentaires; chaque pays intègre un certain nombre de paramètres et leur accorde un poids différent. On voit apparaître un vaste ensemble d'indices traduisant l'état de la structure de chaussée et prenant plus ou moins en compte les aspects liés à la surface de chaussée.

L'état de Washington (Nelson et Leclerc, 1982) utilise le *Pavement Serviceability Index (PSI)* qui est un indice de viabilité dérivé de celui créé dans le cadre des essais *AASHO* (1962). Cet indice est évalué en fonction du niveau de dégradation et de la qualité de planéité de la chaussée. La province de l'Alberta au Canada (Haas et Huot, 1995) utilise l'Index de Qualité de Chaussée (*IQC ou PQI*) qui prend en compte des indicateurs élémentaires de dégradation de structure de chaussée, un indice lié au confort de conduite (*IR*), un indice visuel d'état de chaussée (*IQS*) et un indice de qualité structurelle (*IR*). En France (Lepert et Goux, 1994), l'opération *Image Qualité du Réseau de routes Nationales (IQRN)* de 1992 permet d'élaborer la note patrimoine, indice "expert" qui caractérise l'état de la structure de chaussée. Cette note est évaluée en fonction du niveau et de l'étendue des dégradations.

I.2- Détermination de lois d'évolution d'états de chaussées

La planification ne va pas sans modélisation, c'est à dire sans la description mathématique de l'évolution des dégradations durant le vieillissement de la chaussée, en fonction des opérations d'entretien pratiquées. Deux approches distinctes peuvent être suivies.

La méthode théorique se base sur des recherches et des expérimentations diverses portant sur une évaluation des propriétés *physiques et mécaniques* des chaussées. Cette méthode est très peu utilisée. On lui préfère, en général, l'approche expérimentale qui vise à établir des relations de cause à effet, sans requérir de connaissances solides sur les principes de mécanique des chaussées. Il s'agit de simplifier l'évolution de l'état de la chaussée par un indice global de qualité. Les modèles obtenus permettent, à partir des données observées sur les états de chaussée, d'évaluer des lois d'évolution moyennes.

Parmi les modèles empiriques, on distingue deux familles. Les modèles de nature *déterministe* sont des analyses de régression statistiques, basées sur l'observation de l'historique du comportement des chaussées. Ces modèles permettent de prévoir les performances futures, en fonction de diverses variables explicatives comme le trafic, le climat, l'âge et les différents entretiens subis par la chaussée. Cette méthode est utilisée lorsque les organismes gestionnaires disposent d'un volume de données et d'une antériorité suffisants. Les modèles *probabilistes* reposent davantage sur la détermination de la probabilité de passage d'un état à un autre, en fonction des tâches d'entretien réalisées. Cette approche s'appuie sur une description discrète du temps et des états de chaussée. Ces modèles intègrent les notions de courbes de survies qui sont également utilisés dans plusieurs systèmes de gestion (Paterson, 1987). La vertu principale d'un tel processus est qu'il permet d'élaborer un système de gestion de chaussées sans accumulation préalable d'une série longue de données. Les modèles de prévision de la détérioration des routes constituent une partie essentielle des systèmes de gestion.

I.3- Définition et choix des stratégies d'entretien

La définition de seuils d'intervention ou de niveaux de priorité sont également indispensables. Des états acceptables et inacceptables sont établis, en spécifiant, d'une part, les proportions maximales de sections pouvant être dans les états inacceptables et, d'autre part, les proportions minimales devant être dans les états acceptables. La définition des choix permet d'établir les objectifs de qualité que se fixent les organismes gestionnaires des routes, et d'évaluer l'état du réseau par rapport à ce niveau de qualité.

Les stratégies d'entretien peuvent concerner le maintien (ou l'amélioration) de la structure de chaussée, d'un niveau de service à l'utilisateur ou une solution intermédiaire contenant ces deux éléments.

Beaucoup de solutions sont envisageables quand apparaît le besoin d'entretenir, et à chacune d'elle correspond une courbe de performance typique, évaluée lors de la détermination des lois d'évolution. Plusieurs politiques d'entretien peuvent donc être comparées. Des analyses économiques et la comparaison entre les stratégies d'entretien sont réalisées pour choisir celle qui assurera la plus grande rentabilité.

La plupart du temps, ces comparaisons sont faites dans le cadre d'un module d'optimisation des coûts sur la durée de vie d'une chaussée (coût de construction d'entretien et de remise en état).

I.4- Conclusion

Ces étapes présentent la structure générale des systèmes actuels de gestion des chaussées, au niveau réseau. Certains systèmes sont plus complexes mais la logique suit toujours la même démarche: acquisition de données et évaluation de l'état du réseau, modélisation du comportement des chaussées et de l'effet de différentes stratégies d'entretien et enfin, définition et choix des stratégies.

Les systèmes de gestion de chaussées représentent aujourd'hui un des outils de gestion les plus élaborés de rationalisation des choix techniques et des processus de décision. Les nombreuses publications et communications en matière de systématisation de la gestion des routes montrent que ces outils d'aide à la décision sont devenus indispensables pour tous les organismes gestionnaires.

Les systèmes de gestion ne sont pas, dans tous les pays, au même stade de développement et de nombreux progrès peuvent encore être réalisés. Parmi les systèmes de gestion les plus anciens, on trouve le système *Highway Design Maintenance* qui s'applique au contexte des pays en voie de développement. La France a mis au point son propre outil de gestion, la gamme *GiRR (Gestion Intelligente des Réseaux Routiers)*, au début des années 1990. Aux Etats-Unis, chaque état développe son propre système de gestion. Le système de gestion développé par l'état de l'Arizona au début des années 80 a permis de faire évoluer la gestion des routes des méthodes subjectives non quantitatives vers un système moderne qui intègre de vraies politiques de décision. Les effets de ce nouveau mode de gestion sont particulièrement significatifs. La première année d'utilisation s'est concrétisée par une réduction des dépenses de 14 millions de dollars. Le budget prévu pour conserver le réseau dans les états standards était de 46 millions, le système de gestion a permis de n'en dépenser que 32, avec conservation des mêmes standards. L'année suivante, la tendance a été confirmée, 28 millions de dollars ont été nécessaires pour conserver le réseau (Kulkarni, 1984). La province de l'Alberta (Haas et Huot, 1995) a également publié des bénéfices obtenus grâce à la mise en place du système de gestion des chaussées. Durant une période de 5 années, antérieure à la mise en place du système, la province a dépensé 40 millions de dollars par an pour obtenir un Indice de Qualité de Chaussée (*IQC*) de 6.3. Suite à l'utilisation de système de gestion, pour un niveau de dépense annuelle et une période équivalents, un accroissement de l'*IQC* allant jusqu'à 6.8 a été observé. Cet accroissement s'est produit en dépit du vieillissement du réseau et de la baisse de la valeur du dollar.

II- Le système de gestion de l'administration française: la gamme *GiRR*

En vue d'établir un bilan global de la politique routière menée depuis 20 ans sur le réseau de routes nationales (renforcements coordonnés et entretien préventif), la direction des routes française a mis en place un système de recueil de données à grande échelle: L'opération *IQRN* (Image Qualité du Réseau National). Cette opération a été initiée en 1992 par le réseau technique de l'équipement. L'objectif essentiel est l'évaluation de l'état des chaussées qui s'appuie sur un recueil d'états élémentaires de chaussée. Les données recueillies permettent d'établir une notation de l'état de la surface (note surface) et de la structure de chaussée (note patrimoine). La base de données *IQRN* constituée représente une photographie globale de l'état du réseau.

La confrontation des résultats obtenus avec certaines hypothèses de la méthode de dimensionnement ou du guide de l'entretien préventif a permis d'évaluer l'efficacité des techniques d'entretien mises en place. L'opération *IQRN* de 1993 concerne l'auscultation de 30.000 km de routes nationales (dont 28.000 km ont subi un renforcement). Le bilan de la politique routière a été réalisé sur cette base. Plus de 20% du réseau non renforcé a une note patrimoine inférieure à 17 contre environ 20% du réseau renforcé. L'effet de la politique routière suivie depuis 1970 est donc manifeste. Toutefois, l'entretien préventif est très coûteux et la conservation de standards de qualité représente des dépenses annuelles considérables.

Dans le but d'améliorer les techniques de gestion, les services de l'équipement ont progressivement développé une gamme de logiciels, la gamme *GiRR* (Gestion Intelligente des Réseaux Routiers), en vue de gérer de manière plus optimale l'entretien du réseau de routes nationales et départementales (Freitas *et al.*, 1998). L'opération *IQRN* permet de collecter une masse importante de données permettant d'élaborer un tel outil. Les auscultations du réseau national ont donc été poursuivies au rythme d'un tiers du réseau national par an.

Ce souci de gestion plus global conduit à une hiérarchisation des routes nationales du réseau français selon la fonction de la route et le réseau supporté. On distingue dorénavant 5 types de routes: les Grandes Liaisons Autoroutières du Territoire (*GLAT*), les Liaisons Autoroutières en Continuité du Réseau Autoroutier (*LACRA*), les Voies Routières Urbaines (*VRU*), les routes nationales de liaison (*RNL*) et les Routes Nationales Ordinaires (*RNO*). Chacune de ces catégories ne nécessite pas le même niveau d'entretien, compte tenu de sa fonction économique ou d'aménagement du territoire.

La gamme *GiRR* est composée de plusieurs modules. Chacun des modules a un rôle précis d'évaluation, et l'ensemble de la gamme constitue le système de gestion des chaussées de l'administration française.

II.1- *GiRR-ÉVALUE*

GiRR-ÉVALUE (Lepert et Goux, 1994) est un outil de suivi qui permet au Maître d'Ouvrage d'avoir une idée précise de l'état global du réseau. La démarche méthodologique consiste à suivre l'évolution de l'ensemble du réseau et à s'en servir comme indicateur descriptif de l'effet de la politique routière mise en œuvre. *GiRR-ÉVALUE* attribue à chaque section de chaussée de 200 mètres de longueur, une note relative à l'état de la structure de la chaussée et une note présentant la qualité de surface.

L'évaluation des notes repose sur l'estimation des travaux que nécessiterait une remise en état. La notation est donc directement reliée aux coûts des travaux conventionnels¹ pour remettre la chaussée en un état de référence qui est la chaussée neuve.

Ainsi, une chaussée en parfait état aura une note patrimoine et une note surface égales à 20, et une chaussée de note patrimoine égale à 0 nécessitera les travaux maximum pour être remise en état.

Ce système de notation décrit à l'encadré présente un double aspect, technique et économique. Il apporte les éléments pour l'évaluation des budgets de remise ou de maintien en état du réseau de routes.

<p><u>Note patrimoine:</u></p> $NP = 20 \left(1 - \frac{C_p}{C_{p \max}} \right)$	<p><u>Note surface:</u></p> $NS = 20 \left(1 - \frac{C_s}{C_{s \max}} \right)$
<p>Où C_p désigne le coût, au m^2, des travaux conventionnels nécessaires pour remettre en état la structure de chaussée,</p> <p>$C_{p \max}$ désigne le coût maximum de remise en état d'une chaussée en fin de vie,</p> <p>C_s désigne le coût, au m^2, des travaux conventionnels nécessaires pour remettre en état la couche de roulement,</p> <p>$C_{s \max}$ désigne le coût maximum de remise en état d'une couche de roulement.</p>	

II.2- GiRR-STRATÈGE

GiRR-STRATÈGE (Renault *et al.*, 1995) est un processus itératif qui permet de simuler l'évolution de l'état du réseau à moyen ou long terme. Chaque itération simule l'évolution du réseau en une année. Partant de l'état actuel, le processus applique une loi d'évolution déterminée en fonction de l'entretien réalisé. Une présentation détaillée de ce module est réalisée en section III.

II.3- GiRR-PROGRAMME

GiRR-PROGRAMME (Lepert 1996) est un outil de gestion utilisé au *niveau local*. Il met en application la politique globale définie avec les simulations de *GiRR-STRATÈGE*. *GiRR-PROGRAMME* précise, en s'appuyant sur des normes techniques, des politiques d'entretien annuelles.

Le programme se base sur des indicateurs caractérisant le type de chaussée (structure, trafic) et l'état de la chaussée (notes surface et patrimoine). L'analyse des dégradations d'une section de chaussée permet de classer le processus de dégradation parmi un certain nombre de pathologies. La définition des tâches de maintenance résulte directement de l'application systématique, et longueur par longueur, des stratégies de maintenance décidées. Ces tâches sont précisées sous forme de grille de décision qui définissent les travaux à réaliser. Des contraintes locales, techniques ou économiques peuvent perturber les programmations proposées par *GiRR-PROGRAMME*. Dans ces situations, grâce à un système interactif, les actions d'entretien peuvent être modifiées. Ces modifications sont prises en compte dans le programme et la planification annuelle est alors automatiquement ajustée.

II.4- GiRR-EXPERT

¹ Les besoins en entretien sont conventionnellement exprimés en centimètres de béton bitumineux, donc, en coût d'entretien (F/m²). A partir des prix unitaires de 1992, on établit le coût des travaux conventionnels les plus lourds (20cm de grave bitume + 8 cm de béton bitumineux), correspondant à NP=0, à 280 F/m² Dans une échelle de 0 à 20, un point de note "vaut" donc 14F/m² .

Dans certaines situations, la solution proposée par le module de programmation doit être affinée. Ces situations surviennent lorsque des incohérences sont observées dans les bases de données ou lorsque des travaux majeurs sont recommandés. Cette prescription est validée dans le cadre de *GiRR-EXPERT*.

GiRR-EXPERT s'appuie alors sur les données de la base et les complètes de mesures plus précises (identification précise du type de structure, mesure de la déflexion et des caractéristiques de surface). L'information ainsi collectée est analysée grâce au système expert *ERASMUS* (Note Information SETRA, 1990) qui permet de déterminer de façon précise le diagnostic ainsi que les travaux à réaliser sur une section. Ce logiciel est représentatif de l'expertise et des connaissances françaises et peut être adapté à d'autres contextes.

III- Fiabilisation de GiRR-STRATÈGE

III.1- Les données utilisées par GiRR-STRATÈGE

L'estimation de l'évolution du comportement de chaussées se base sur les données issues de la campagne d'auscultation IQRN (Image Qualité du Réseau National) de 1993. Les données routières sont référencées dans différents fichiers, par familles de structure de chaussée et classe de trafic, tel qu'indiqué au Tableau 1. A chaque section, on associe l'âge de la dernière couche de roulement, la note patrimoine et une note surface. La note surface, comprise entre 0 et 20, décrit les états de la couche de roulement. La note patrimoine, évaluée sur une même échelle, traduit la qualité structurelle de la chaussée. Une chaussée notée 20 est en parfait état, une chaussée notée 0 nécessite les plus forts travaux d'entretien. La présente étude ne concerne que les notes patrimoine. Pour chaque famille, le fichier se présente donc de la façon indiquée au Tableau 2.

Tableau 1: Les familles Structure Trafic du réseau national

type\structure	Fort Trafic (FT)	Trafic Moyen (TM)	Trafic Faible (T1)
Grave Bitume (GB)	GBFT	GBTM	GBT1
Grave Hydraulique (GH)	GHFT	GHTM	GHT1
Non Traité (NT)	NTFT	NTTM	NTT1

Tableau 2: Extrait du fichier de données

Section	Classe de trafic	Date de couche de roulement	Note patrimoine
1	T0	1988.06	9.00
2	T0	1988.06	9.00
3	T0	1985.06	9.00
4	T0	1986.06	9.00
5	T0	1979.04	10.00
6	T0	1979.04	10.00
7	T0	1979.04	11.00
8	T0	1976.08	11.00
9	T0	1976.08	6.00
10	T0	1990.06	20.00

III.2- Méthodologie d'estimation des courbes de survie

GiRR-STRATÈGE prend en entrée les données du réseau (note patrimoine, note surface et âge de couche de roulement) ainsi que les différentes stratégies d'entretien définies par les experts routiers. L'évolution du réseau est obtenue par l'estimation de fonctions de survies qui permettent de d'évaluer l'état du réseau à chaque âge. Dans un second temps, les passages d'un état à un autre, en fonction d'une politique d'entretien, sont décrits selon un processus de Markov. Finalement, le résultat de la simulation permet d'obtenir des courbes d'évolution moyenne pour différentes stratégies. Les pratiques d'entretien sont ensuite comparées sur la base de leurs coûts et des courbes d'évolution estimées.

Les fonctions de survie donnent, en fonction de l'âge de la couche de roulement, la probabilité de se maintenir dans un état structurel donné. Afin d'obtenir des courbes de survie monotones, les états retenus ne sont pas les notes IQRN mais les ensembles de notes supérieures ou égales à une note. On s'intéressera, par exemple, à l'état "note supérieure ou égale à 13" et non à l'état "note égale à 13".

La méthode de traitement est une méthode paramétrique, et l'ajustement se fait selon une fonction de Weibull. Ce type de loi a été retenu pour sa facilité d'utilisation et son adaptation reconnue à la modélisation des phénomènes routiers. Les lois de Weibull ont notamment été utilisées dans le système de gestion Highway Design Maintenance (HDM) développé par la Banque Mondiale. De plus, la fonction de Weibull est particulièrement flexible puisqu'elle regroupe une famille de courbes asymétriques pour différentes valeurs des paramètres.

La fonction de survie, pour un état de référence fixé " $note \geq j$ ", s'écrit donc comme suit:

$$S_j(t) = \exp\left(-\exp\left(\frac{\log(t) - i_j}{s_j}\right)\right) \tag{1}$$

où i_j et s_j sont deux paramètres à estimer.

Etant donnée la nature de la base de données (une observation en 1993 pour chaque section du réseau), des censures en temps ont été définies de la façon suivante, pour l'état de référence " $note \geq j$ ":

. Si une section présente une note inférieure à j , elle n'est plus dans l'état de référence à la date d'observation (âge de la couche de roulement). Dans ce cas, l'information apportée par cette section sera: " la durée de vie de la section dans l'état "note supérieure ou égale à j " est inférieure à l'âge de la section ". La contribution à la fonction de vraisemblance de cette section est alors sa fonction de répartition, $F_j(T, \theta) = P(T < t)$, qui représente la probabilité pour que la durée de vie de la section dans l'état soit inférieure à l'âge de la couche de roulement.

. Si une section a une note supérieure ou égale à j , elle est encore dans l'état de référence à la date d'observation, et l'information apportée est " la section va avoir une durée de vie dans l'état au moins égale à l'âge de la couche de roulement ". La contribution à la fonction de vraisemblance de cette section sera sa fonction de survie, $S_j(t, \theta) = P(T \geq t)$.

On définit ainsi une variable de censure, d_i , telle que

- . Si $d_i=1$, la contribution de la section à la vraisemblance est sa fonction de survie.
- . Si $d_i=0$, la contribution est la fonction de répartition.

La fonction de vraisemblance s'écrit donc de la façon suivante:

$$L_j(X, \theta_j) = \prod_{i=1}^n (S_j(X, \theta_j))^{d_i} (F_j(X, \theta_j))^{1-d_i} \quad (2)$$

On obtient les estimateurs des paramètres i et j en maximisant cette fonction de vraisemblance. La méthode consiste à résoudre les conditions du premier ordre:

$$\frac{\partial \log L_j(X, \theta_j)}{\partial \theta_j} = 0 \quad \text{avec } \theta_j = (i_j, s_j)' \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial \log L_j(X, \theta_j)}{\partial i_j} = 0, \quad \frac{\partial \log L_j(X, \theta_j)}{\partial s_j} = 0 \quad (4)$$

Pour chaque famille de structure/trafic, 21 courbes de survies (les notes vont de 0 à 20) ont été estimées. Ces courbes donnent la probabilité de rester dans l'état "note supérieure ou égale à une note fixée" au-delà d'un certain âge t . Un exemple est fourni à la Figure 1.

La répartition des sections dans différentes notes à chaque âge t est donnée par des vecteurs d'état, $E_t = (X_{20}, X_{19}, \dots, X_0)'$ avec X_i , proportion de sections ayant la note i à l'âge t parmi toutes les sections du même âge. La donnée des courbes de survies ne permet pas d'obtenir ces proportions. La solution retenue a été de soustraire les courbes relatives à deux états de référence de bornes inférieures consécutives. Une lecture en "verticale", pour un temps fixé, des 21 courbes de survie fournit alors les vecteurs d'état, comme par exemple à la Figure 2. On définit le vecteur d'état pour une chaussée neuve (âge 0), donné par $(1, 0, \dots, 0)'$, et pour les couches de roulement de 4 ans, on obtient un vecteur d'état contenant X_{18} , X_{17} et X_{16} pour les états de notes respectifs 16, 17 et 18.

Finalement, l'évolution annuelle du réseau, soumis à différentes pratiques d'entretien, est obtenue par un produit matriciel utilisant le processus des chaînes de Markov:

$$V_{ef} = MPT_t * V_{ed} \quad (5)$$

où V_{ef} est un vecteur d'état final décrivant un vecteur d'état E_t , V_{ed} est un vecteur d'état initial décrivant un vecteur d'état E_{t-1} et MPT_t une matrice de probabilité de transition à l'âge t .

Les matrices de probabilités de transition ont été évaluées par un algorithme conçu à l'Université de Bordeaux I (Baali, 1996) qui minimise les écarts quadratiques moyens à chaque âge, entre les probabilités données par les courbes de survie et celles du vecteur d'état final (produit de la matrice par le vecteur d'état initial).

Figure 1: Courbes de survies relatives à la famille de structure GB et au trafic FT pour 4 états de référence

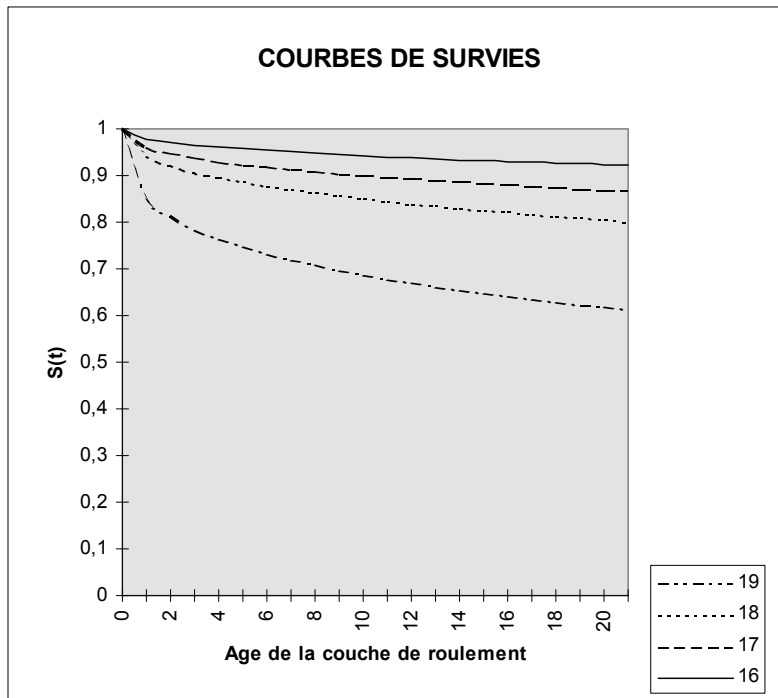
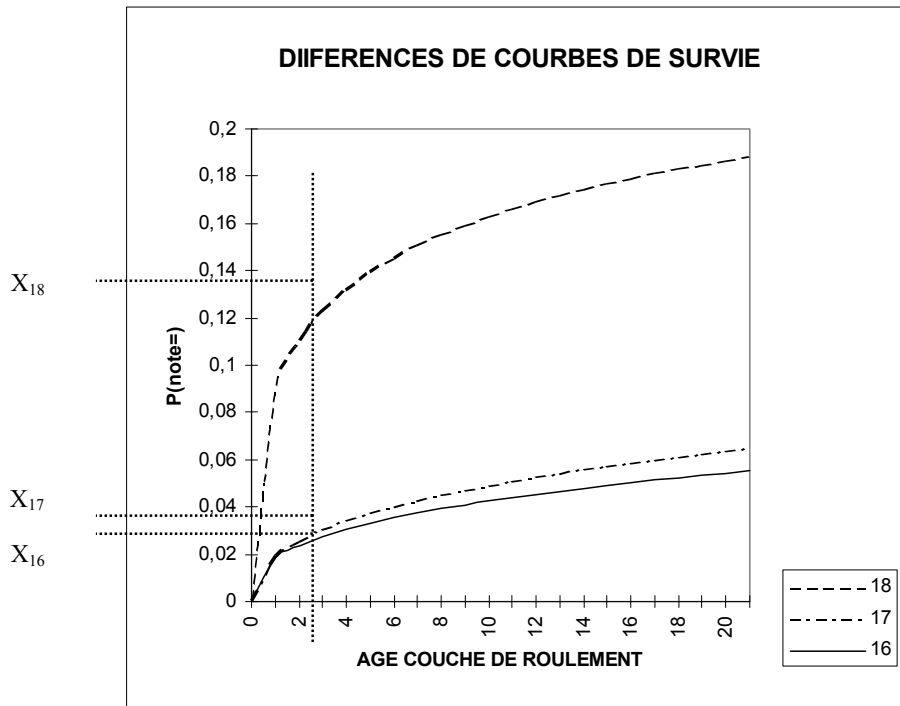


Figure 2: Différence des courbes de survies, réseau GBFT



IV- Intervalles de confiances sur les proportions

Les estimations des courbes de survies sont associées à un certain "degré" d'incertitude. Cette incertitude peut avoir un impact fort sur les résultats d'estimation et sur le choix de la stratégie la plus satisfaisante, tant en terme de budget que d'état de chaussée. Il importe donc d'évaluer ces incertitudes par des intervalles de confiance (Gouriéroux, 1989) associés aux proportions des sections ayant une certaine note, et d'observer leurs conséquences sur les décisions finales.

La méthode utilisée pour obtenir l'intervalle de confiance de la différence de deux fonctions de survies de Weibull est celle des M-estimateurs. L'idée de cette méthode est de s'intéresser à deux états de notes successifs et d'estimer simultanément les coefficients des fonctions de survie. Les estimateurs obtenus pour chaque état sont les mêmes que lorsqu'on estime les fonctions de survie séparément. L'avantage présenté par cette méthode d'estimation est qu'elle permet de calculer la matrice de variance covariance des estimateurs, traduisant les dépendances entre états et estimateurs d'un même état. Nous nous intéressons donc à estimer la proportion de section ayant une note fixée j . Cette proportion se définit comme la probabilité d'être dans la note j à l'âge t et peut s'écrire comme la différence de fonctions de survies suivantes:

$$P\{X_j \geq t\} - P\{X_{j+1} \geq t\} = S_j(t) - S_{j+1}(t) \quad (6)$$

Avec X_j variable aléatoire dont la réalisation est la durée de vie dans l'état note supérieure ou égale à j .

Nous avons maximisé la somme des log-vraisemblances correspondant à deux états de notes successifs, en définissant deux variables de censure: d_i , relative à l'état j , et k_i , à l'état $j+1$:

$$\begin{aligned} \cdot d_i=1 \text{ si l'individu a une note } \geq j & \quad \cdot k_i=1 \text{ si l'individu a une note } \geq j+1 \\ \cdot d_i=0 \text{ si l'individu a une note } < j & \quad \cdot k_i=0 \text{ si l'individu a une note } < j+1 \end{aligned}$$

soit,

- . $d_i=1$ et $k_i=1$ si l'individu a une note $> j$
- . $d_i=1$ et $k_i=0$ si l'individu a une note $=j$
- . $d_i=0$ et $k_i=0$ si l'individu a une note $< j$

La fonction objectif à maximiser est alors:

$$\sum_{i=1}^n d_i \log(S_j(t)) + (1 - d_i) \log(F_j(t)) + k_i \log(S_{j+1}(t)) + (1 - k_i) \log(F_j(t)) \quad (7)$$

Les conditions du premier ordre permettent d'obtenir les estimateurs et de vérifier qu'ils sont identiques à ceux obtenus avec l'estimation par la méthode du maximum de vraisemblance:

$$\frac{\partial d_i \log(S_j(t)) + (1 - d_i) \log(F_j(t)) + k_i \log(S_{j+1}(t)) + (1 - k_i) \log(F_j(t))}{\partial \theta} = 0 \quad (8)$$

Avec $\theta = (\theta_j, \theta_{j+1})'$

et $\theta_j = (i_j, s_j)'$
 $\theta_{j+1} = (i_{j+1}, s_{j+1})'$

Nous obtenons les équations ci dessous:

$$\frac{\partial d_i \log(S_j(t)) + (1 - d_i) \log(F_j(t))}{\partial \theta_j} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial k_i \log(S_{j+1}(t)) + (1 - k_i) \log(F_j(t))}{\partial \theta_{j+1}} = 0 \quad (10)$$

La matrice de variance covariance des paramètres est définie par:

$$Cov(i_j, s_j, i_{j+1}, s_{j+1}) = J^{-1} I J^{-1} \quad (11)$$

avec

$$J = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 (\log(L_j(X, \theta_j)) + \log(L_{j+1}(X, \theta_{j+1})))}{\partial \theta \partial \theta'} \right) \quad (12)$$

et

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial (\log(L_j(X, \theta_j)) + \log(L_{j+1}(X, \theta_{j+1})))}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial (\log(L_j(X, \theta_j)) + \log(L_{j+1}(X, \theta_{j+1})))}{\partial \theta'} \right) \quad (13)$$

On obtient \bar{P} et \bar{J} en remplaçant θ par son estimateur du maximum de vraisemblance dans les formules précédentes.

Les propriétés asymptotiques des M-estimateurs nous permettent d'obtenir la loi de l'estimateur:

$$\sqrt{n}(\bar{\theta} - \theta) \approx AN(0, \bar{F}^{-1} \bar{F} \bar{F}^{-1}) \quad (14)$$

Finalement, le théorème de Cramer nous permet d'obtenir la loi asymptotique de la différence de deux fonctions de survie:

$$f(\bar{\theta}) - f(\theta) \approx AN\left(0, \frac{\partial f(\theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{\bar{F}^{-1} \bar{F} \bar{F}^{-1}}{n} \cdot \frac{\partial f(\theta)}{\partial \theta}\right) \quad (15)$$

avec

$$f(\theta) = S_j(t) - S_{j+1}(t) \quad (16)$$

V- Résultats et applications

V.1- Résultats

Cette méthode permet d'évaluer des intervalles de confiance à 95% pour (i) l'évolution moyenne de la note patrimoine obtenue en multipliant la proportion de sections possédant une note fixée par la valeur de cette note, tel qu'illustré à la Figure 3 ; (ii) l'évolution de la proportion de sections dans une note donnée, comme à la Figure 4.

Figure 3: Courbe d'évolution moyenne et intervalles de confiance, table NTFT

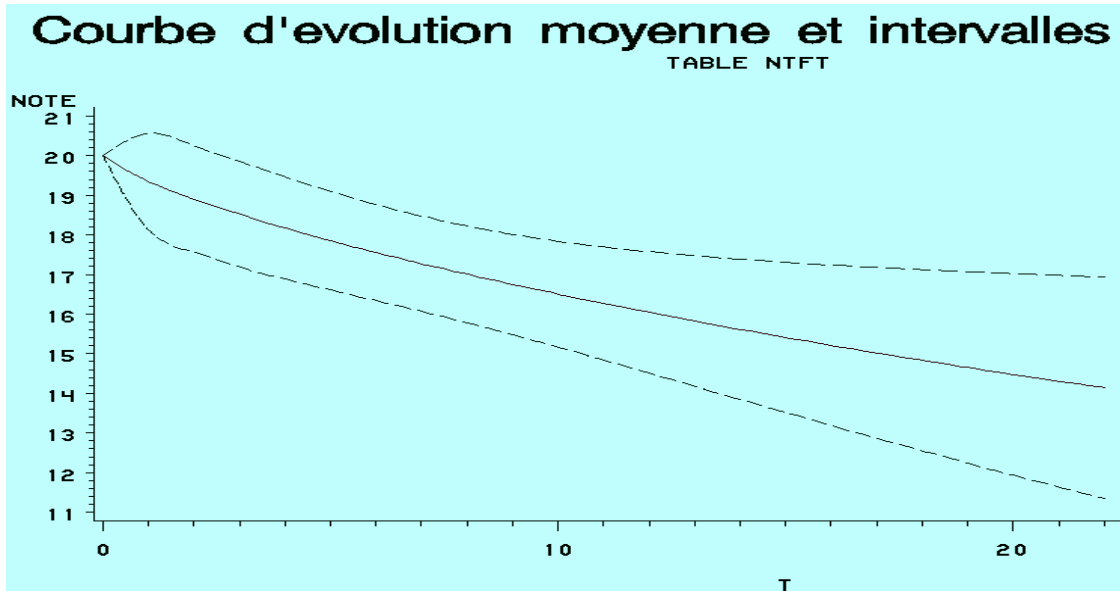
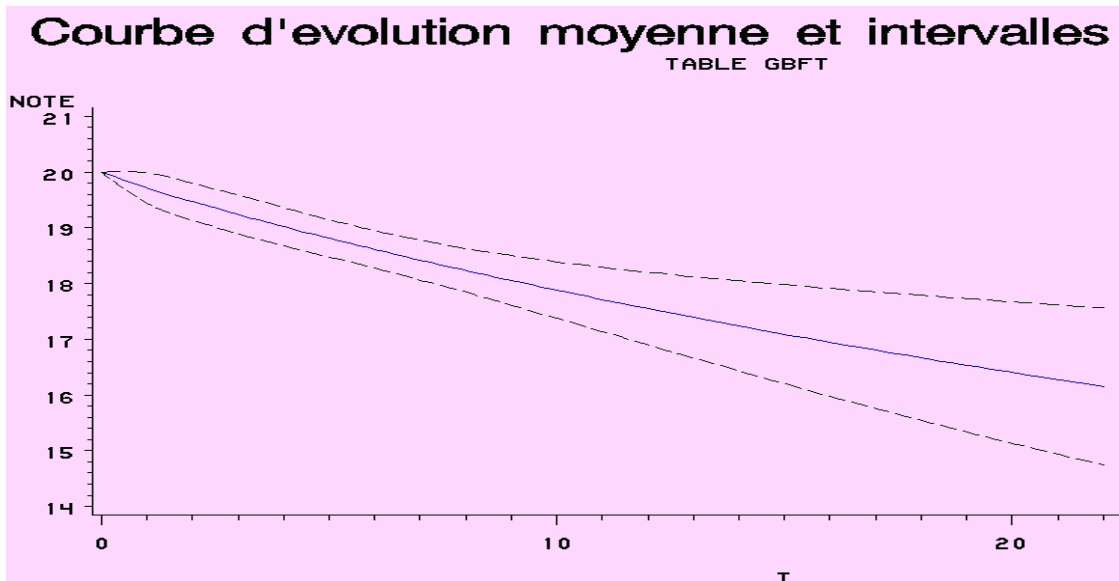


Figure 4: Courbe d'évolution moyenne et intervalles de confiance, table GBFT



Les courbes d'évolution moyenne représentent l'évolution globale du réseau en fonction de l'âge de la couche de roulement. Cette "globalité" se traduit par une plus grande incertitude sur les prévisions. On observe, en effet, une imprécision de 1 à 2 points de note patrimoine selon l'âge de la couche de roulement pour les sections de structure non traitée (NT) subissant un fort trafic (FT) et de 0.5 à 1.5 point de note pour les sections de structure grave bitume (GB) subissant également un fort trafic (FT). Cette différence de précision entre les deux tables s'explique principalement par le nombre de sections présentes dans chacune des bases (environ 5800 sections dans la table NTFT et plus de 24 000 dans la base GBFT).

Figure 5: Proportion de notes égales à 19, table NTFT

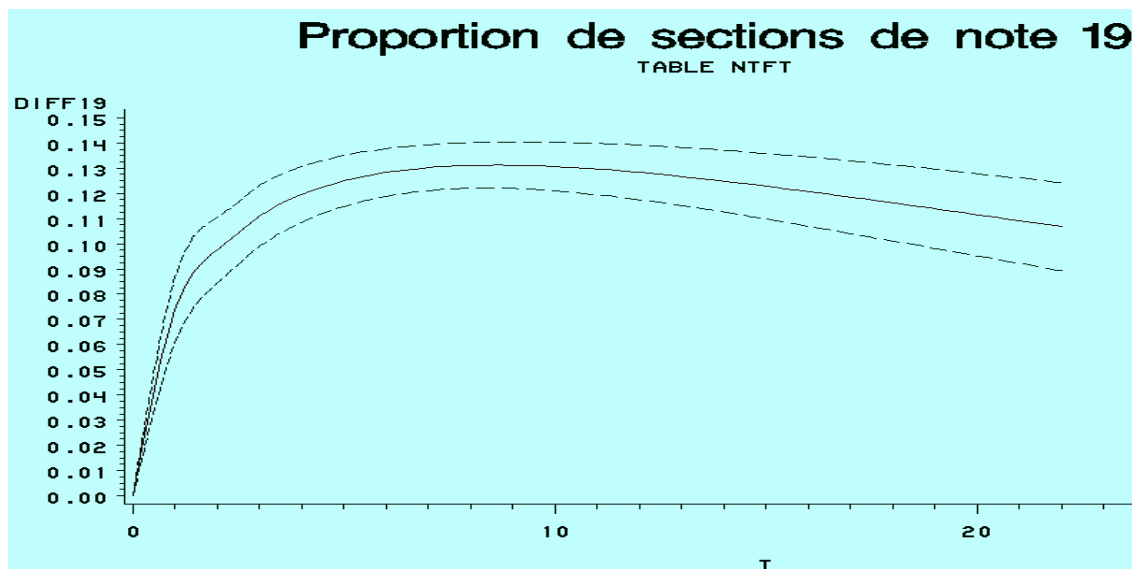
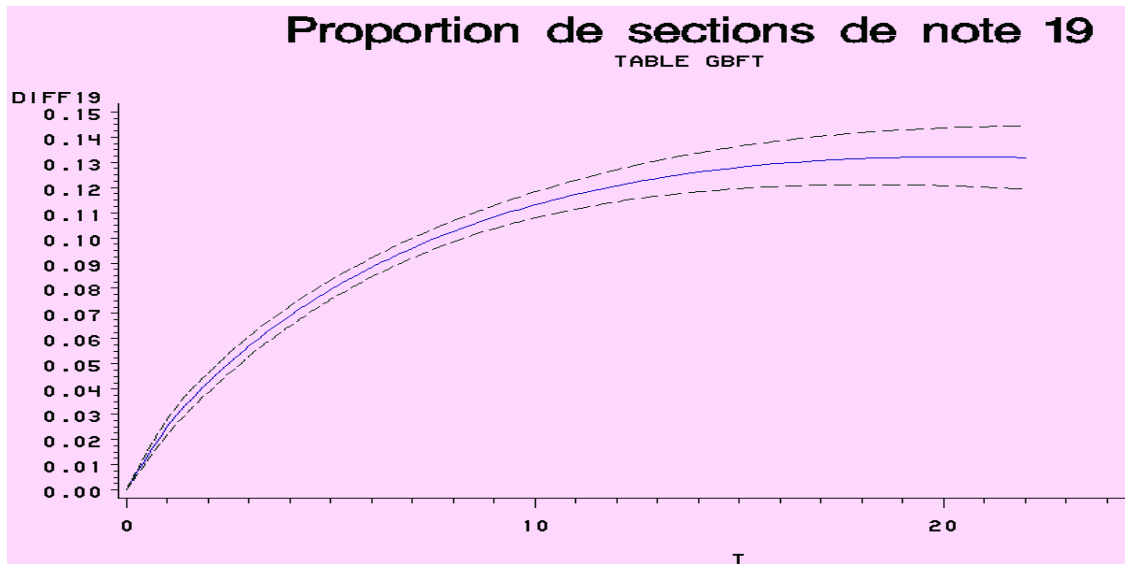


Figure 6: Proportion de sections de note 19, table GBFT



Les courbes d'évolution des proportions décrivent la proportion de sections présentes dans une note donnée en fonction de l'âge de la couche de roulement. Ces courbes sont obtenues par différence de deux fonctions de survies relatives à des états de notes consécutives. Les intervalles de confiance associés présentent une faible imprécision des estimations. Pour les sections de type GBFT dont la couche de roulement a 10 ans, entre 10.7 et 11.7 % des sections ont une note patrimoine égale à 19 et pour les sections de type NTFT, ce pourcentage varie de 12 à 14 %.

Conclusion . On remarque que selon la quantité de sections dans un état de note, l'intervalle de confiance est plus ou moins "proche" de la courbe moyenne. Cette situation est parfaitement logique dans la mesure où plus les données sont nombreuses, plus le comportement des chaussées qu'elles représentent peut être estimé avec précision. Les incertitudes associées aux courbes sont relativement faibles tant au niveau des courbes d'évolution moyennes que des courbes de proportions. Ces résultats permettent d'affirmer que les simulations réalisées par *GiRR-STRATÈGE* à partir des courbes moyennes sont raisonnables et présentent une fiabilité très correcte.

Nous avons choisi d'appliquer le même raisonnement aux routes nationales des départements 31 et 35. Ce travail, à l'échelle départementale, a été réalisé dans le but d'observer si, avec un réseau de moindre longueur, le logiciel *GiRR-STRATÈGE* pouvait fournir des simulations valides.

V.2- Application à des bases de données départementales:

V.2.1- Le département 35

L'état du réseau: (179 Km):

Ce réseau, de structure GB soumis à un fort trafic, est jeune et en bon état structurel. Pour illustrer cette situation, nous présentons la répartition des notes patrimoines: plus de 80% des notes sont égales à 20. Les notes inférieures ou égales à 18 représentent, quant à elles, environ 10% du réseau. De même, nous observons sur l'histogramme fourni que plus de 70% de sections ont une couche de roulement d'âge compris entre 0 et 8 ans.

Figure 7: Répartition des notes, département 35

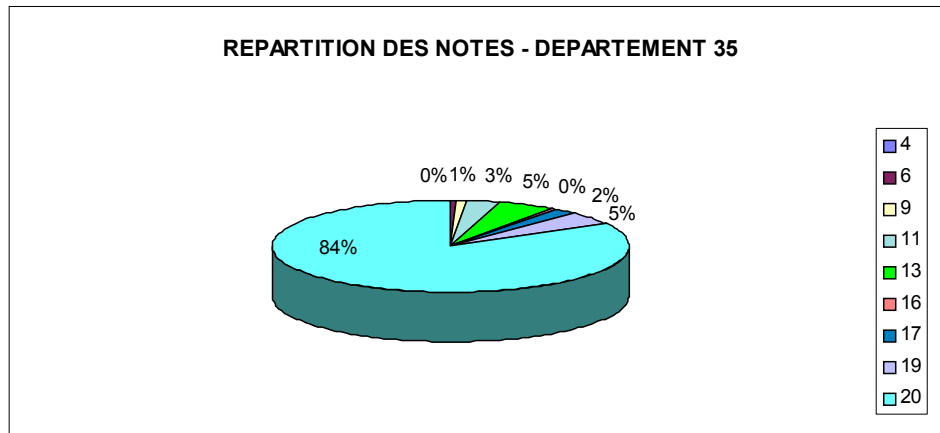
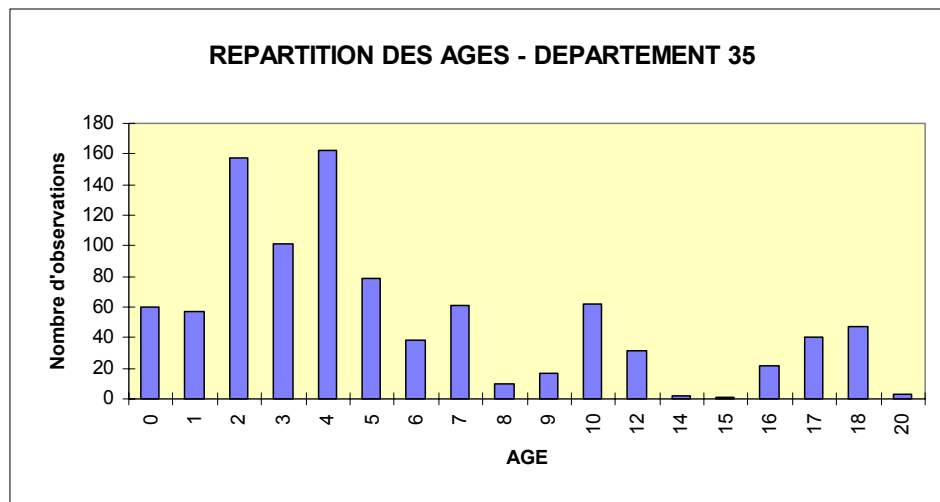


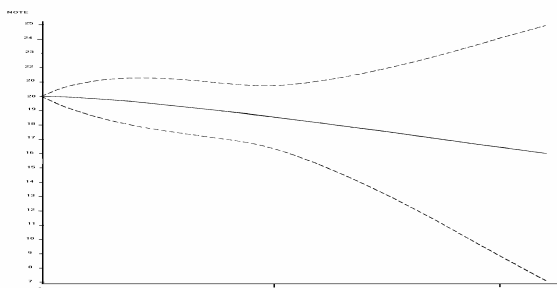
Figure 8: Répartition des âges de couche de roulement, département 35



Résultats obtenus:

Les résultats sont très fortement dépendants de l'état du réseau ainsi que de l'importance relative des données disponibles. On observe, en effet, que les intervalles de confiance de la courbe d'évolution moyenne divergent très nettement après 9 - 10 ans. Ceci est dû à la très faible représentativité des sections d'âge de couche de roulement supérieur à 10 ans. On observe également la sensibilité des intervalles de confiance à la taille globale de l'échantillon. La courbe d'évolution moyenne et les intervalles de confiance associés sont donnés à la Figure 9.

Figure 9: Courbe d'évolution moyenne et intervalles de confiance, département 35



V.2.2- Le département 31

L'état du réseau: (105 Km)

Le réseau GBFT du département 31 est plus “ équilibré ” que celui du département 35 en terme d'état structurel de chaussée. Bien que ce réseau présente une forte proportion de sections de notes patrimoine élevées (notes 20 à 17), la représentation de chacun de ces états n'est pas négligeable et la représentativité des notes plus basses est non nulle. Le même constat s'applique aux âges de couche de roulement. Il n'y a pas, dans la base de données, de classe d'âge aussi prépondérante que la première classe d'âge du département 35.

Figure 10: Répartition des notes, département 31

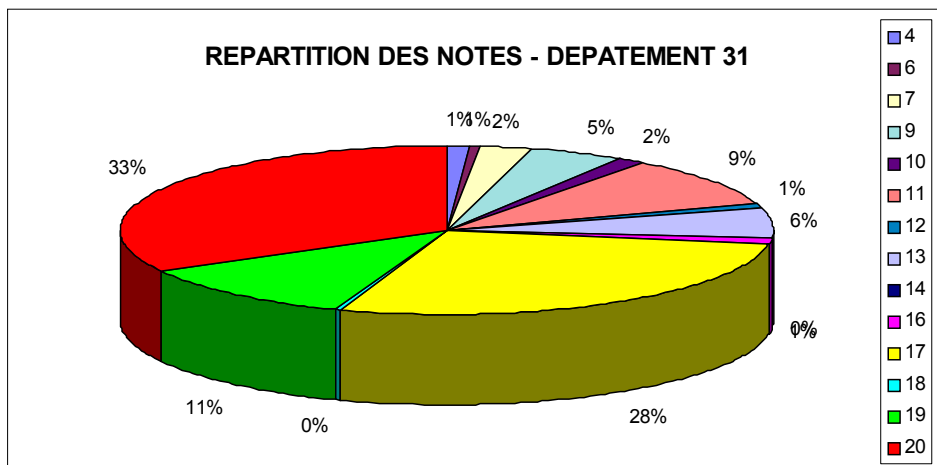
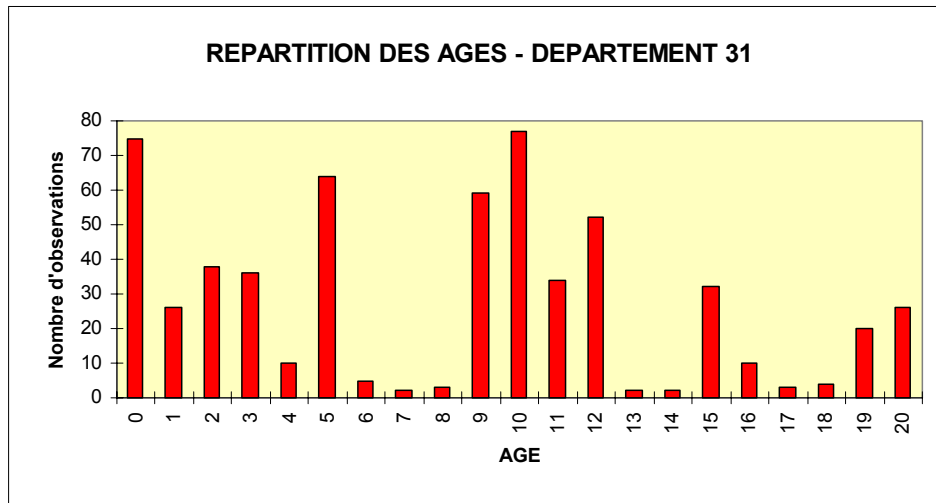


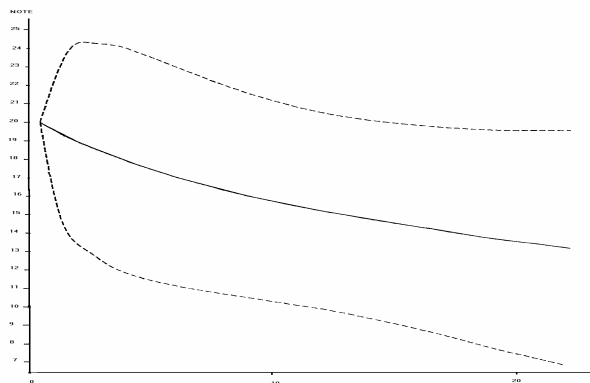
Figure 11: Répartition des âges de couche de roulement, département 31



Résultats obtenus:

Une fois de plus, on observe que les résultats sont très nettement liés à l'état du réseau. Le réseau 31 étant bien équilibré, les intervalles de confiance le sont aussi. Ils présentent un caractère régulier et ne divergent pas en un point précis qui indiquerait la trop faible représentativité d'un caractère spécifique des variables. Les intervalles de confiance sont très larges (environ + ou - 6 points de note). On peut expliquer cette situation par le fait que le nombre relatif de variables (par rapport à la taille de l'échantillon GBFT département 35) est relativement faible, mais surtout par le fait que les sections présentes dans la base ont des caractéristiques très diverses, pour un âge fixé, les notes observées présentent une variance importante.

Figure 12: Courbe d'évolution moyenne et intervalles de confiance, département 31



Conclusion. Les intervalles de confiance sont sensibles au nombre d'observations. L'étude appliquée aux départements le confirme, tant au niveau de la représentativité d'une caractéristique dans la base de donnée, qu'au niveau du nombre total d'observations.

Une étude qui chercherait à modéliser la dégradation des chaussées à l'échelle départementale nécessiterait que l'on porte un intérêt particulier au "nettoyage" de la base de données. En effet, compte tenu de la faible quantité de données, les valeurs aberrantes sont prises en compte et leur poids dans les calculs n'est pas négligeable. En l'état actuel de la base de données, il n'est pas possible de réaliser des simulations au niveau départemental, les données sont trop dispersées et trop peu nombreuses pour offrir un niveau de fiabilité incontestable.

V.3- Simulations de stratégies

Une autre exploitation possible des intervalles de confiance peut être effectuée au niveau des simulations. Les programmes d'estimation des matrices de transition de Baali (1996) sont trop "rigides" pour être utilisés dans le cas des intervalles de confiance. En effet, les programmes prennent en entrée les valeurs de i et j des différentes fonctions de survie de Weibull, se chargent de réaliser les différences et estiment les matrices. Les intervalles de confiance n'étant pas des fonctions de Weibull, il n'est pas possible de paramétrer les programmes pour les matrices de probabilité de transition relatives à ces intervalles. Nous avons testé le solveur d'Excel pour estimer ces matrices. La fonction objectif à minimiser est la somme des carrés des erreurs, et les contraintes sont, en outre, somme des lignes égales à un, valeurs de la matrice toutes positives.

Deux cas d'études sont présentés, le raisonnement se fait sur les courbes d'évolutions moyennes.

V.2.3.1- Cas d'étude n°1: On souhaite avoir plus de 80% de sections dans l'état note supérieure à 16. Dès que l'on atteint une valeur proche de 20% de sections de note inférieure à 16, on entretient toutes ces sections. Ceci a pour conséquence de remonter leur note à 20 Les autres sections continuent à se dégrader selon la courbe d'évolution moyenne estimée.

Méthode. Les notes se dégradent selon la courbe d'évolution moyenne. On entretient l'ensemble des sections de note inférieure à 16 dès que l'on atteint le seuil. On obtient, après l'entretien, un nouveau vecteur d'état qui caractérise la répartition des chaussées dans les différentes notes. On évalue la note moyenne obtenue du réseau entretenu à partir de ce nouveau vecteur. La courbe moyenne d'évolution nous permet, alors, de déduire un âge moyen. Les données âge moyen et note moyenne nous permettent de nous déplacer sur la courbe d'évolution moyenne et de modéliser l'évolution de la dégradation à venir.

Les résultats. Les intervalles de confiance permettent d'envisager la situation au pire et au mieux. On observe que les prévisions d'entretien en fonction de l'âge de la couche de roulement peuvent être estimés avec une erreur de plus ou moins deux ans. Cet écart s'amplifie pour le deuxième entretien et passe à 4 ans. Ces prévisions et la connaissance des incertitudes attachées permettent au gestionnaire d'anticiper les réhabilitations et les entretiens des chaussées tout en planifiant de façon rigoureuse les actions à mener.

	PREMIER ENTRETIEN			DEUXIEME ENTRETIEN		
Prévision d'entretien	Au pire	En moyenne	Au mieux	Au pire	En moyenne	Au mieux
Age de la couche à l'entretien	11 ans	13 ans	15 ans	15 ans	19 ans	23 ans

V.2.3.2- Cas d'étude n°2: On entretient tous les 10 ans en remontant les notes inférieures à 13 au niveau de la note 20.

La démarche suivie est la même. Les sections se dégradent selon la courbe d'évolution moyenne pendant 10 ans. A l'issue de cette période, nous disposons des vecteurs d'état E10 et E11 qui décrivent la dispersion des sections dans les différentes notes aux âges de couche de roulement 10 et 11. La donnée de ces deux vecteurs permet d'estimer la matrice de passage de E10 à E11. Nous appliquons

cette matrice aux sections de notes \geq à 13 et remontons les autres à la note 20. Nous obtenons, alors, un nouveau vecteur d'état qui donne la note moyenne du réseau après l'entretien qui nous permet de déduire un âge moyen. Ces deux données nous permettent de situer le réseau sur la courbe d'évolution et de simuler les dégradations futures.

Les résultats sont intéressants jusqu'au premier entretien, ensuite, les courbes d'évolution sont moins précises et irrégulières. Ceci est dû à l'estimation des matrices de probabilité de transition. Le solveur d'Excel n'est pas suffisamment puissant pour permettre une estimation convergente à chaque itération.

Figure 13: Simulation de la première stratégie

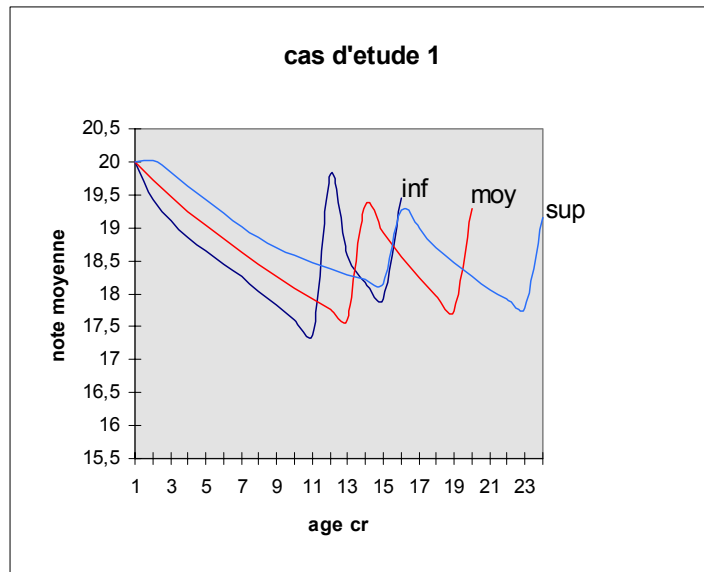
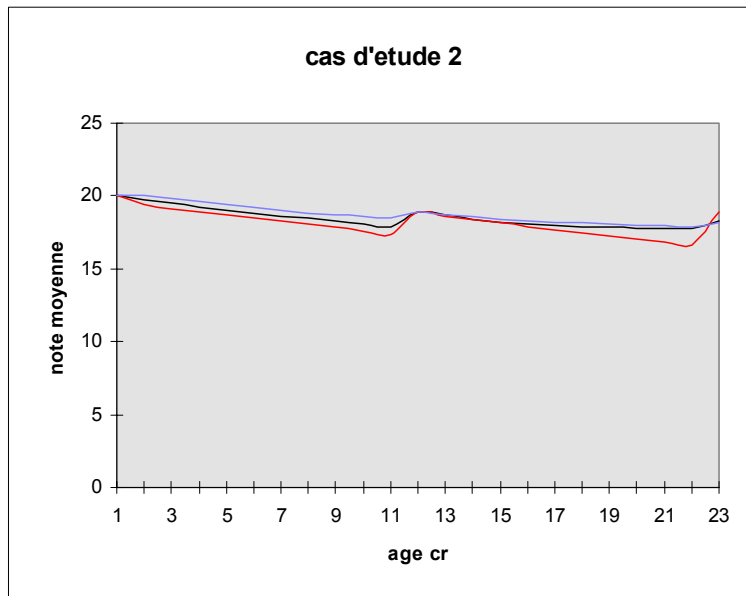


Figure 14: Simulation de la seconde stratégie



Conclusion. L'ensemble de ces résultats est à considérer avec précaution. Ils ont nécessité l'estimation des matrices de probabilité de transition relatives aux intervalles de confiances qui n'est pas toujours convergente. Néanmoins, cette proposition d'utilisation des intervalles de confiances pourrait être approfondie pour être intégrée dans le logiciel GIRR STRATÈGE. Nous pourrions ainsi évaluer les conséquences de différentes politiques d'entretien sur l'état du réseau et fournir l'incertitude associée à cette prévision. De la même façon, les incertitudes sur les dates auxquelles les entretiens doivent être réalisés pourront permettre une gestion différente des budgets disponibles et permettre une plus grande flexibilité dans les décisions d'entretien.

VI- CONCLUSION

Les fonctions de survie permettent d'établir des lois de comportement "fiables" malgré le caractère éphémère de la période d'observation. Les intervalles de confiance permettent d'évaluer l'ampleur de l'erreur commise. La méthode des M-estimateurs pour l'estimation de la différence de deux fonctions de survies s'est avérée tout à fait appropriée à la problématique. L'ensemble des variances et covariances entre estimateurs d'un même état et de deux états de notes successifs est considéré.

Le principal intérêt de cette étude est qu'elle présente des outils fiables pour établir un modèle de comportement de chaussées sur la base d'une unique campagne d'auscultation du réseau routier. Toute agence de transport désireuse d'établir un modèle de comportement de chaussées était, jusqu'à présent, confrontée au problème de l'accumulation de données, ce qui contribuait à retarder considérablement la mise en place d'un système de gestion.

La fiabilisation du logiciel *GiRR-STRATÈGE* s'est faite par la recherche des intervalles de confiance associés aux courbes d'évolutions moyenne. Il apparaît que les simulations effectuées sur l'ensemble du réseau routier national sont valides, les erreurs de prévision à 15 ans sont faibles pour l'ensemble des familles structure trafic de sections. En revanche, une application à l'échelle départementale de ces simulations serait discutable. En effet, les intervalles de confiance sont, dans l'ensemble, sensibles au nombre de sections étudiées, à la représentativité de chacun des âges de couches de roulement et des notes patrimoines et aux erreurs de mesures présentes dans l'échantillon. Par ailleurs, nous proposons deux utilisations possibles des intervalles de confiances dans les procédures de simulations, ce qui permettrait de donner des incertitudes, à la fois, sur l'état futur du réseau et sur les temps auxquels les entretiens peuvent être programmés.

Références

- AASHO (American Association of State Highway Officials), (1962), "AASHO road Test". *Highway Research Board*, Report 5, Pavement Research, Special Report, Washington, D. C.
- BAALI N., (1996), "Contribution a la modélisation et à la gestion d'un réseau routier", thèse de doctorat, *Université de Bordeaux I*.
- FREITAS N., LEPERT P., RENAULT D., (1998), "L'entretien des routes: Aide à la gestion de l'entretien des réseaux routiers avec la gamme GiRR", *Revue Générale des Routes et Aérodrômes* n°765. pp.24-26..
- GOURIEROUX C., (1989), "Econométrie des variables qualitatives", *Economica*.
- HAAS R., HUOT M., (1995), "L'implémentation d'un système de gestion des chaussées et les bénéfices à long terme: l'exemple de l'Alberta", *Recherche Transport*. Bulletin d'information scientifique n°20. Volume Thématique. pp. 1-19.
- KULKARNI R., (1984), "Dynamic decision model for pavement management system", *Transportation Research Record* 997, pp. 11-18.
- LEPERT P., GOUX M.T., (1994), "Evaluation du réseau français de routes nationales basé sur le relevé de dégradations de surface", *4ième Congrès International de la Route*, Rabat.
- LEPERT P., (1996), "Outil d'aide à la programmation de l'entretien. GiRR: Premières applications en site pilote", *Revue Générale des Routes et Aérodrômes* n°744.
- NELSON T.L., LECLERC R.V., (1982), "Development and Implementation of Washington State's Pavement Management System". *Washington State Dep. of Transportation*. Report n°WA-RD 5001.
- OCDE, (1987), "Systèmes de gestion des chaussées", *Recherche en matière de routes et de transports routiers*.
- PATERSON W. D. O., (1987), "Prediction of road deterioration and maintenance effects: Theory and quantification", *The Highway Design Maintenance Standard Series*, The World Bank, John Hopkins Press.
- RENAULT D., MENAUT F., LEROUX S., (1995), "Méthodes d'évaluation et de suivi et simulation de politiques d'entretien des chaussées sur le réseau routier national français", *20ième Congrès Mondial de la Route*, Montréal.
- SETRA, (1990), "ERASMUS, un système expert pour l'entretien routier", *SETRA Note Information*.
- WANG K. L. P., ZANIEVSKI J., WAY G., DELTON J.(1993), "Revision to Arizona department of transportation pavement management system", *Transportation Research Record* 1397, pp. 68-76.