

Une recherche menée dans le cadre européen : le contrat PARIS (Performance Analysis of Road InfraStructure) d'analyse du comportement des infrastructures routières

François BRILLET
Chargé de recherche
Service d'Études et Recherches Internationales (SERI)

Philippe LEPERT
Directeur de recherche
Chef de la section Auscultation et Gestion des Routes (SAGR)
Service Technique des bases aériennes

Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Introduction

Govert T.H. Sweere
Coordinateur du projet PARIS

Le contrat PARIS (Analyse de performances des infrastructures routières) s'est attaché au développement de modèles de performances routières pour les systèmes de gestion de l'entretien routier. Le projet a été réalisé sous l'égide du programme développement des transports routiers du 4e programme cadre de la Commission européenne. Les bases scientifiques de ce projet avaient été établies au cours de l'action 324 du projet COST « Comportement à long terme des chaussées » dans les années 1994-1997. Les chercheurs du LCPC ont apporté leurs données issues de sections témoins et d'expérimentations sur le manège de fatigue à la fois pour l'action COST et le projet PARIS.

Les contraintes du 4e programme cadre ne laissent que deux ans pour créer la base de données du projet, effectuer l'analyse et valider les modèles développés à l'aide de données indépendantes. La nécessité de disposer d'informations sur les performances à long terme des planches d'essais a impliqué l'utilisation de données « historiques » afin de compléter les données recueillies au cours du projet. Ceci a entraîné, à son tour, une étude approfondie de la normalisation des données de dégradations de chaussées fournies par les quinze pays participants.

Dans ces conditions, les études détaillées de modélisation des dégradations de chaussées ont été exclues dès le lancement du projet. Une approche pratique cohérente avec l'application ciblée des résultats obtenus dans la pratique courante d'entretien a donc été adoptée pour le projet.

La validation des modèles simples issus du projet, et leur adéquation aux conditions de chaque pays, devraient être réalisées localement.

Le contrat PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure) a associé quinze pays d'Europe, avec pour objectif la mise au point de modèles d'évolution des chaussées, destinés aux systèmes de gestion de l'entretien. Ce contrat a duré deux ans (octobre 1996 à septembre 1998), pendant lesquels les participants ont exécuté un suivi de sections témoins, en y ajoutant (pour onze d'entre eux) les données « historiques » relevées antérieurement. Des données résultant d'essais accélérés (type manège de fatigue) ont été fournies par la France, la Suisse et l'Espagne, mais elles ont été traitées séparément.

L'article décrit le catalogue des données, puis le « calage » mis au point pour utiliser les relevés de dégradations fondés sur les méthodes de quantification différentes. Il présente quelques résultats de l'analyse des données, et indique les recherches que les participants ont jugées souhaitables de poursuivre avant de déboucher sur des modèles fiables et généralisables.

MOTS CLÉS : 22-23 - Chaussée (corps de) - Comportement - Mesure - Essai - Chargement - Altération (gén.) - Modèle mathématique - Déflexion - Uni - Réseau routier - Europe - Contrat - Évolution - Section expérimentale - Contrôle - Continu - Temps réel - Manège - Catalogue - /Infra-structure.

Le contexte du contrat

Les décisions en matière de conception et d'entretien des chaussées mettent en jeu des actions à moyen, voire à long terme. Les décideurs cherchent en particulier à espacer les opérations d'entretien, afin de réduire au maximum les coûts qu'elles entraînent. On pense bien sûr aux coûts directs subis par le maître d'ouvrage, mais il faut y ajouter les coûts indirects, associés aux retards subis par les usagers et aux nuisances produites.

La **prévision du comportement des chaussées** est ainsi indispensable pour construire des **modèles** qui permettent au gestionnaire d'optimiser ces interventions. Mais les lois de comportement restent mal connues, malgré les outils théoriques dont nous disposons depuis maintenant plusieurs décennies. Cela s'explique par les incertitudes sur les variables explicatives, dont certaines peuvent être très dispersées (les propriétés du sol, l'hydrologie, la qualité et les épaisseurs des matériaux en place) et d'autres impossibles à connaître à l'avance (aléas climatiques, évolution et agressivité du trafic).

Mais si la prévision du **comportement exact** d'une section de route reste hors de notre portée, son **comportement probable** peut être approché par le biais de méthodes statistiques bien appliquées. C'est ce qui explique, malgré la pertinence des modèles théoriques, l'intérêt pour une approche **empirique** reposant sur des données assez faciles à acquérir, permettant de déduire des lois applicables à un vaste contexte.

Ce type d'étude fait appel à des chaussées réelles, construites selon les techniques appliquées sur chantier normal, et le suivi doit faire appel aux moyens courants d'évaluation de l'état des chaussées (relevés de dégradation, mesures d'uni, de déflexion, et éventuellement de glissance).

En fait, on distingue deux types d'expériences :

➤ Les essais « **en temps réel** » (RLT = *Real-time loading tests*) qui consistent à suivre, jusqu'à un âge égal au cycle de vie de la chaussée (de l'ordre de dix ans), des sections recevant un trafic réel ;

➤ Les essais « **accélérés** » (ALT = *Accelerated loading tests*) où l'on applique un chargement artificiel reproduisant les effets d'une circulation normale, mais sur une échelle de temps contractée (quelques semaines ou quelques mois).

Les essais accélérés utilisent soit des pistes spécialement créées et recevant des véhicules réels avec une fréquence accélérée, comme ce fut le

cas des essais AASHO aux États-Unis [HRB, 1961], soit des dispositifs spéciaux tel le Manège de Fatigue du LCPC [OCDE, 1991].

Les expériences en temps réel sont les plus nombreuses (rien qu'en France on peut en dénombrer plus d'une dizaine), car elles peuvent être initiées sans gros moyens. La longue durée de l'expérience la rend toutefois difficile à gérer, d'où le risque d'arrêt prématuré, ou des difficultés d'interprétation si les techniques de construction ou les moyens de mesure ont évolué.

Aux États-Unis, une expérience en temps réel a été lancée en 1987, et se poursuit encore aujourd'hui [FHWA, 1996] : il s'agit du **LTPP** (*Long Term Pavement Performance program* = programme d'études des performances à long terme des chaussées) mis en œuvre dans le cadre du SHRP (*Strategic Highway Research Program*), et qui consiste à suivre sur une longue période environ 2 000 sections de routes réelles aux États-Unis et au Canada.

Il n'existait jusqu'à présent en Europe aucune action de cette envergure, mais il est apparu que la somme des programmes mis en œuvre à l'initiative des administrations nationales ou régionales dépassait largement l'ampleur du LTPP. C'est cette constatation qui a donné l'idée, reprise par la Commission des Communautés Européennes, d'une banque de données rassemblant les résultats des expériences réalisées sur l'ensemble du continent.

Pour cela, le groupe COST 324 [CCE, 1997] a été créé en 1994. Ses travaux ont fourni un inventaire des expériences en cours, et ont posé les bases d'une mise en commun des résultats. L'enquête a montré que 25 projets de ce type étaient en cours ou venaient de s'achever dans huit pays différents, avec un budget total annuel d'un million et demi d'ECU.

C'est sur ces conclusions qu'a été fondé le contrat PARIS, signé en septembre 1996 pour une durée de deux ans (octobre 1996 à septembre 1998) et associant quinze pays participants (dont six contractants), représentés en tout par dix-sept organismes (tableau I) [CCE, 1999].

Les données

Le tableau I donne la liste des pays participants, avec le nom du ou des organismes associés et le nombre de sections suivies dans le cadre du contrat.

TABLEAU I
Les pays et organismes participants, et le nombre de sections traitées

Pays	Organismes	Temps réel	Accélééré
Autriche	Bundesforschung und Prüfenzentrum Arsenal (BPFZ) Institut für Strassenbau and Strassenhaltung, Université Technique de Vienne (ISTU)	12	
Belgique	Centre de Recherches Routières (CRR)	66	
Danemark	Danish Road Institute (DRI)	7	
Espagne	Centro de Estudios y Experimentación (CEDEX)	10	6
Finlande	Valtion Teknillien Tutkimuskeskus (VTT)	33	
France	Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC)	22	21
Grèce	Université Nationale Technique d'Athènes (NTUA)	10	
Hongrie	Közlekedéstudományi intézet Rt (KTI Rt)	61	
Irlande	National Roads Authority (NRA)	25	
Pays-Bas	Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW) Sichting Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Ground Water en Wegenbouw en der Verkeerstechniek (CROW)	205	
Portugal	Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)	51	
Royaume-Uni	Transport Research Laboratory (TRL)	28	
Slovénie	Zavod Za Gradbenistvo (ZAG)	54	
Suède	Swedish National Road and Transport Research Inst. (VTI)	296	
Suisse	Laboratoire des Voies de Communication (LAVOC), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)	36	17
Total		914	44

Critères de choix des expériences

Pour les expériences en temps réel, il avait été convenu de réaliser un suivi annuel sur des sections comportant déjà deux relevés « historiques » (antérieurs au démarrage du contrat). Ceci devait permettre d'obtenir au moins quatre relevés en comptant les deux années de durée du contrat, ce qui limitait le choix aux seuls programmes déjà engagés. Cependant, les pays qui ne pouvaient pas proposer de données « historiques » étaient invités à initier un programme de suivi, dont les résultats seraient soumis à une « validation », consistant à vérifier que les modèles obtenus pouvaient s'appliquer aux quatre pays concernés (Belgique, Irlande, Portugal et Slovénie).

La participation française

Le programme français en temps réel a concerné les 22 sections dont le suivi avait été initié en 1993 dans la foulée du programme SHRP de l'administration américaine (fig. 1). Bien sûr, la France disposait des résultats de plusieurs autres programmes de suivi de sections témoins, parmi lesquels les « sections d'essais » des Renforcements Coordonnés, le programme SISERD (Saisie In Situ et Exploitation des Relevés de Dégradation) du réseau national, l'Observatoire des Techniques, et plusieurs programmes à l'initiative de maîtres d'ouvrage locaux. Mais ces actions étaient en général trop ciblées ou déjà anciennes ; de plus, une conversion des données aurait nécessité des délais et des moyens incompatibles avec les clauses du contrat.

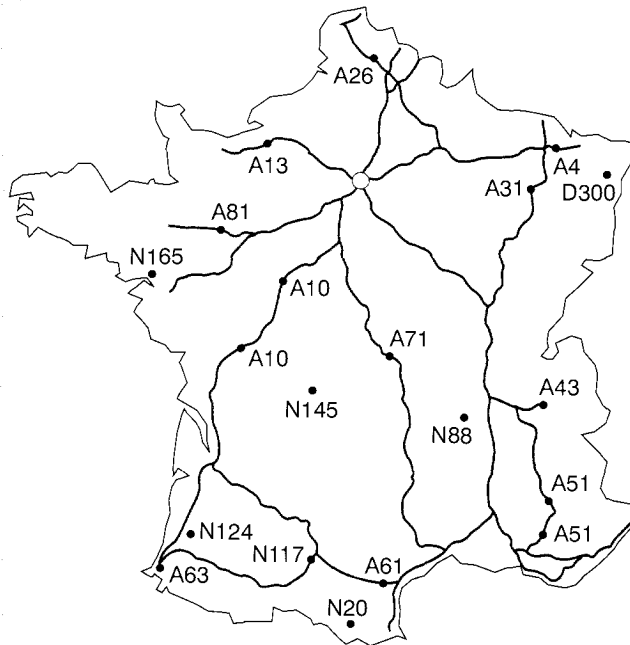


Fig. 1 - Les sections suivies par la France.

La contribution des essais accélérés

L'objectif final était de fonder des modèles sur des cas réels, ce qui excluait *a priori* les essais accélérés. En outre, seulement trois pays participants (Espagne, France et Suisse) disposaient d'une installation adaptée à ce type d'expérience. Il avait été convenu cependant que les pays en question fourniraient des résultats afin de rechercher les **formes des lois** d'évolution, mais non les coefficients de ces lois. En effet, le suivi des essais accélérés est à la fois plus fréquent (jusqu'à plusieurs dizaines de relevés par expérience), plus précis et plus riche en éléments explicatifs (propriétés des matériaux, conditions climatiques, etc.). Ainsi, les résultats du Manège de Fatigue du LCPC ont été mis à contribution, pour des expériences généralisables et ne posant pas de problème de confidentialité.

Le catalogue des données

Les données concernant les sections suivies en temps réel sont organisées en dix « tables » au format Microsoft ACCESS (la collecte des données se faisant au format Microsoft EXCEL), les résultats des essais accélérés étant traités séparé-

ment. Ces tables contiennent soit des informations générales (une par section quel que soit le nombre de relevés), soit des résultats recueillis lors des relevés successifs. Le tableau II donne la liste des tables de données et des champs qu'elles contiennent ; il faut y ajouter les champs d'identification (numéros, dates, etc.) ainsi que les tables « inventaire » et « dégradations normalisées », celle-ci devant contenir les résultats des relevés après application du calage décrit plus loin.

Cette liste de données peut paraître « passe partout », même si elle a donné lieu à des débats longs et animés tout au long des travaux du groupe COST 324. Dans ce domaine comme dans d'autres, l'intégration européenne est en marche mais est encore loin d'être accomplie ! D'autre part, la consistance et les objectifs des programmes de suivi en cours dans les différents pays offraient une grande diversité. Par exemple le programme français consistait à suivre un échantillonnage réduit de routes à fort trafic, avec un catalogue de données très étendu ; pour d'autres pays il s'agissait au contraire d'un programme extensif, avec suivi léger d'un grand nombre de sections très variées en trafics et en structures.

TABEAU II
Liste des données

Tables	Données
Climat	Température moyenne sur l'année Nombre de jours avec maximum dépassant 25 °C Nombre de jours avec minimum au-dessous de 0 °C Indice de gel Pluviométrie annuelle moyenne
Construction	Type de chaussée Type de surface Épaisseur bitumineuse totale Épaisseur des couches rigides Épaisseur de la base non traitée Épaisseur de fondation Type de fondation Type de couche rigide éventuelle
Déflexion	Position transversale de la mesure Déflexion mesurée à x mm du centre de la charge (11 valeurs de 0 à 2 400) Nombre de mesures Charge appliquée Diamètre de la plaque Type d'appareil Température du matériau bitumineux lors de la mesure Température de surface lors de la mesure Température de l'air lors de la mesure
Historique	Année de construction Année du dernier rechargement Année de la couche de surface
Dégradations	<i>Voir chapitre sur le calage</i>
Uni longitudinal	IRI (International Roughness Index) Type d'appareil de mesure Nom de l'appareil de mesure
Orniérage	Profondeur moyenne de l'ornière extérieure Profondeur moyenne de l'ornière intérieure Profondeur moyenne de l'ornière maximale Nom d'appareil de mesure Longueur de la règle utilisée pour la mesure
Trafic	Nombre de véhicules par jour dans le sens de la section Pourcentage de véhicules lourds Nombre de véhicules par jour sur la section Nombre d'essieux équivalents de 10 tonnes sur la section

Choix des principes de mesure

Voici quels étaient les critères retenus :

- **Permettre à tous les pays participants de fournir une donnée** conforme à celle du catalogue ou convertible selon une règle admissible ;
- **Exclure ce qui n'est pas couramment utilisé en gestion de l'entretien**, comme les paramètres de formulation des enrobés ou l'historique des données météorologiques.

D'autre part, même si cela n'était pas présenté comme un objectif principal, l'idée d'une compatibilité minimale avec les données américaines du LTPP était également fortement présente dans les décisions.

Pour la **déflexion**, malgré l'intérêt des Français et des Anglais pour la méthode « statique » (déflectographe LPC ou poutre Benkelman), c'est la méthode « dynamique » du type FWD (*Falling Weight Deflectometer*) qui a été retenue. En effet, ce type d'appareil existe dans tous les pays concernés (un exemplaire a été acquis en France dans un but de recherche), et des études ont été menées sur cet appareil dans le cadre européen [LEPERT et al., 1997].

Pour l'**uni longitudinal**, une grande diversité règne, mais une échelle internationale existe, l'IRI (*International Roughness Index*). Celle-ci résulte de travaux réalisés sous l'égide de la Banque Mondiale, qui a publié une méthode [SAYERS et al., 1990] autorisant le calcul direct ou son estimation à partir d'une grande variété d'appareils. C'est donc l'IRI qui a été retenu, malgré les critiques exprimées sur ce choix : cette échelle est avant tout conçue comme un indicateur de confort et de coût d'usage, et non comme un paramètre de suivi.

La **glissance**, en revanche, a été exclue du champ de l'étude, compte tenu de la diversité des principes utilisés, et du fait que tous les pays ne pratiquent pas ce type de mesure.

Enfin, pour les dégradations de chaussées proprement dites, un programme spécial de travail a été mis au point, afin de permettre la conversion de toutes les données dans une grille unique.

Le calage des relevés de dégradation

Les dégradations de surface sont, avec l'uni, la déflexion et l'adhérence, les paramètres les plus pertinents et donc les plus fréquemment employés pour évaluer l'état des chaussées et déterminer leurs besoins en entretien. Leur relevé, pratiquement toujours visuel, constitue la base de toute étude d'entretien, en particulier lorsqu'elle se situe au niveau d'un réseau routier. La prévision du comportement des chaussées passe nécessairement par celle de l'évolution de leurs dégradations de surface. L'un des objectifs importants de PARIS était de produire ces modèles d'évolution.

Cet objectif ne pouvait être envisagé que si l'on disposait d'informations exploitables sur les dégradations apparues pendant la durée du suivi. Rappelons que, sur quinze pays participants,

onze étaient en mesure de remettre ces informations (relevés « historiques »), les quatre autres (Belgique, Irlande, Portugal et Slovénie) devant initier un programme de suivi. Les informations remises par ces quatre pays devaient servir à « valider » les modèles développés et non à les mettre au point.

Chacun des onze pays disposant de relevés historiques les avaient obtenus en employant une méthode qui lui était propre, et souvent significativement différente de celles employées par les autres partenaires. Les informations remises n'étaient donc pas directement exploitables, car elles ne pouvaient être confrontées ou assemblées telles quelles. Il a donc été décidé de définir une méthode de relevé spécifique, sorte de « standard PARIS », appliquée directement par les quatre pays « validants », et rétroactivement aux relevés « historiques » des onze autres.

Pour parvenir à ce double résultat – définir un standard « PARIS » et convertir les relevés historiques –, un travail spécifique a dû être engagé, d'abord dans le cadre du groupe COST 324, puis dans celui du contrat PARIS lui-même :

➤ dans le premier, recensement des dégradations relevées dans chacun des pays partenaires, avec leur mode de quantification (étendue et gravité), sur la base d'une enquête et des catalogues de dégradations utilisés dans chacun de ces pays [CCE, 1997] ;

➤ dans le second, liste des dégradations à relever, avec définition de leur niveau de gravité et méthode commune de relevé, puis procédure de conversion des relevés historiques en données au standard PARIS, pays par pays [CCE, 1997-2].

Recensement des dégradations relevées dans chaque pays

Le tableau III dresse la liste des dégradations relevées dans les quinze pays participant aux travaux de COST 324 et PARIS, en mentionnant si le relevé distingue ou non plusieurs niveaux de gravité [CCE, 1997]. On observe qu'une demi-douzaine de ces dégradations sont relevées dans plus de la moitié des pays, formant ainsi l'ossature du relevé préconisé pour le contrat PARIS. Dans la plupart des cas, une notion de gravité est attachée à ces dégradations.

Définition d'une méthode et d'un catalogue communs

Les travaux de PARIS ont porté sur les dégradations les plus significatives de l'état d'endommagement des chaussées. Certaines caractérisent la

fatigue de l'assise sous l'effet du trafic :

- la détérioration des fissures transversales de retrait,
- les autres fissurations transversales dans les bandes de roulement,
- les fissurations longitudinales dans les bandes de roulement,
- les fissurations et faïençages dans les bandes de roulement,
- les fissurations formant des petites dalles, sur les chaussées semi-rigides,
- les déformations transversales, de type affaissements de rive ou hors rive (l'orniérage faisant l'objet d'une mesure spécifique).

D'autres traduisent plutôt l'évolution du revêtement, notamment sous l'effet des contraintes d'environnement :

- les arrachements,
- les fissures longitudinales non spécifiques aux bandes de roulement,
- les fissures transversales non spécifiques aux bandes de roulement, sur chaussées souples.

Les réparations de type « emploi partiel » et « colmatage de fissures » ont également été notées, parce qu'elles pouvaient notamment expliquer certaines régressions des étendues des dégradations observées.

Dans la méthode de relevé définie, chaque dégradation est quantifiée par deux grandeurs : son étendue et sa gravité. **L'étendue** est égale à la longueur de la chaussée affectée par la dégradation, exprimée en pourcentage de la longueur totale de la section. Ce choix présente l'avantage de simplifier la procédure de relevé, et surtout de lever certaines ambiguïtés. Ainsi, lorsqu'une fissure présente plusieurs branches, il n'est pas nécessaire de mesurer la longueur de chacune des branches, ni de chacune des ramifications. La contrepartie de cet avantage réside dans une perte de précision, qui peut toutefois être partiellement compensée par un changement de gravité. **La gravité** résulte, en effet, du croisement de plusieurs paramètres : par exemple, celle d'une fissure dépend à la fois de son ouverture, de la présence ou non de branches et autres ramifications, et de l'état des bords de fissure. Chaque dégradation possède trois niveaux de gravité : significatif, intermédiaire, et grave. Le tableau IV illustre cette échelle de gravité, sur le cas des fissures longitudinales se développant dans les bandes de roulement.

Cette définition des dégradations et de leur gravité, ainsi que du mode de relevé, a été formalisée dans un document spécifique produit dans le cadre de PARIS [LEPERT, 1997].

TABLEAU III
Relevé des dégradations et de leur gravité
dans les pays participant aux travaux de COST 324 et PARIS

	Nombre de pays relevant la dégradation (sur 15 pays)	Nombre de pays jugeant la gravité (sur 15 pays)
Fissurations		
Longitudinale, bandes de roulement	12	11
Longitudinale, hors bandes de roulement	9	8
Transversale	13	12
Faiçonnage, bande de roulement	9	6
Faiçonnage, hors bande de roulement	2	2
Mise en dalle	3	2
Joint (longitudinal et transversal)	8	7
En étoile	1	1
Nids de poule	8	6
Déformations		
Orniérage	10	8
Affaissement localisé hors rive	6	5
Affaissement localisé en rive	3	2
Bourrelet, consécutif au gel	2	1
Bourrelet, autre cause	1	0
Surface déformée	1	1
Dégradations propres aux enrobés		
Ressuage	5	4
Arrachement	8	8
Pelade	2	2
Glaçage	2	2
Désenrobage	4	3
Dégradations propres aux enduits superficiels		
Peignage	2	2
Départ de granulat	5	3
Pelade	2	2
Détériorations liées à la fissuration		
Pompage	2	1
Détérioration de rive	6	6
Défaut d'épaulement	3	3
Réparation		
Colmatage de fissure	11	6
Emploi partiel, purge	11	8

TABLEAU IV
Niveau des gravités des fissures longitudinales
dans les bandes de roulement

Morphologie Largeur	Fissure fine et unique	Fissure unique, avec ramifications	Fissure multiple ou avec épaufrure
< 2 mm	S	I	I
2 - 8 mm	I	I	G
> 8 mm	G	G	G
S : Significative - I : Intermédiaire - G : Grave.			

Principe de conversion des relevés historiques

L'exploitation des relevés historiques, remis par les onze pays concernés dans leur propre système de codification, nécessitait une conversion dans le système standard décrit dans le paragraphe précédent. Cette conversion a été réalisée dégradation par dégradation.

Les étendues des différents niveaux de gravité d'une dégradation, relevées selon la méthode propre au pays concerné, forment un vecteur :

$$D = \begin{pmatrix} d_s \\ d_i \\ d_g \end{pmatrix}$$

dans lequel d_s est l'étendue de la dégradation dans sa forme significative, d_i celle dans sa forme intermédiaire, et d_g celle dans sa forme grave. Lorsque certains niveaux de gravité n'existent pas dans la méthode de relevé, les coefficients correspondant dans le vecteur sont mis à zéro. Le même état de dégradation s'exprimera, dans la codification PARIS, par un vecteur similaire :

$$D_p = \begin{pmatrix} d_{ps} \\ d_{pi} \\ d_{pg} \end{pmatrix}$$

Le problème de la conversion est alors ramené à l'identification de la matrice de transfert par laquelle il faut multiplier D pour obtenir D_p . Il s'agit au total de déterminer, pour chaque pays ayant produit des relevés historiques, un ensemble de matrices de transfert, soit une par dégradation. Le tableau V illustre, pour le cas du faïencage dans les bandes de roulement relevé en France, selon le mode opératoire M4 de la méthode LPC 38 [BERTRAND et LEPERT, 1993], la conversion décrite ci-dessus.

Établissement des matrices de transfert

Fixer les coefficients de ces matrices impliquait une analyse préalable des modes de relevé réellement pratiqués dans chaque pays. Or tous les pays ne disposaient pas d'un document décrivant la méthode de relevé, ou, s'il existait, le document proposé avait une valeur plus théorique que pratique. Un groupe de quatre experts a donc été constitué (Royaume-Uni, France, Pays-Bas et Finlande) auquel il fut demandé d'établir les matrices de transfert applicables aux relevés de chaque pays à partir d'une analyse, sur le terrain, des pratiques de relevé. Ce groupe d'experts s'est déplacé successivement dans chacun des quinze pays participants, pour y rencontrer les agents chargés des relevés (les « releveurs »).

La visite comportait chaque fois quatre étapes :

- choix, par le responsable national PARIS, de quelques sections représentatives des sections suivies dans le cadre du contrat ;
- visite de ces sections par le groupe d'experts accompagnés des « releveurs » locaux ;
- analyse des critères effectivement appliqués par les « releveurs » pour codifier les dégradations ;
- détermination des matrices de transfert.

Conséquences sur la fiabilité des données de dégradations

La conversion des relevés produits par les partenaires a permis d'obtenir des données plus homogènes, sans qu'il ne faille pour autant sous-estimer les difficultés inhérentes à cette procédure. D'une part, les méthodes de relevé et de codification des dégradations étaient, dans certains pays, si éloignées des dispositions adoptées pour PARIS que la conversion n'a pu être que très approximative ; d'autre part, les coefficients des matrices de transfert n'ont pas été obtenus par analyse statistique, loin s'en faut ! Il s'agit de valeurs données « à dire d'experts », après interrogation des « releveurs » de chaque pays. Si l'on ajoute à ces difficultés l'inévitable dispersion des relevés visuels de dégradations, même réalisés par une même équipe et selon une même méthode [LIVNEH et al., 1994], on ne pouvait espérer que les analyses statistiques menées sur l'ensemble des données soient caractérisées par des coefficients de corrélation élevés.

Lorsqu'on examine les résultats de ces analyses, il convient donc de garder à l'esprit les difficultés évoquées ci-dessus.

Les voies suivies pour l'analyse

Traitements préliminaires

Les variables listées dans le tableau II ont servi à générer d'autres variables, notamment les trafics cumulés (exprimés en nombre équivalent d'essieux simples à roues jumelées chargés à 100 kN) associés aux différents relevés. D'autre part, pour les dégradations deux types de lois ont été recherchées :

- celle déterminant l'**apparition** de la dégradation,
- celle déterminant son **évolution** une fois apparue.

Un premier travail exploratoire a permis de sélectionner d'une part les variables « expliquées » (parmi les paramètres d'état) les plus

TABLEAU V
Conversion dans le standard PARIS du faïençage dans les bandes de roulement,
tel que relevé en France

PARIS	Transfert	×	FRANCE (M4)
% faïençage significatif	=	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0,7 \end{bmatrix}$	% faïençage signif. 1 BDR
% faïençage intermédiaire			% Faïençage signif. 2 BDR
% faïençage grave			% faïençage grave

TABLEAU VI
Principales variables traitées dans l'analyse

Dégradations	Temps réel	Accélééré	Variable expliquée	Variable explicative
Fissures : Apparition	×		Trafic cumulé ou âge d'apparition	Trafic/âge, déflexion
• Dans les traces				
• Fissuration totale	×		Trafic cumulé ou âge d'apparition	Trafic/âge, déflexion, climat
• Fissuration transversale de retrait (semi-rigides)			Âge d'apparition	Épaisseur bitumineuse, climat, épaisseur et résistance des couches rigides
Fissures : Évolution	×	×	Étendue et gravité de la fissuration (%)	Âge/Trafic
• Dans les traces				
• Fissuration transversale de retrait (semi-rigides)	×		Étendue et gravité de la fissuration (%)	Climat, Trafic/Âge
Orniérage	×	×	Profondeur d'ornièr (mm)	Âge/Trafic
Uni longitudinal	×		Uni (IRI, mm/m)	Âge/Trafic
Arrachements	×		Étendue (%)	Âge/Trafic

exploitables ; il est apparu en effet que certaines dégradations, extrêmement rares ou peu prévisibles, ne pouvaient pas faire l'objet de lois d'évolution. Un travail similaire a été fait pour les variables « explicatives » afin de rechercher celles qui avaient le plus fort pouvoir de prédiction sur les variables expliquées. Le tableau VI résume le résultat de cette sélection.

Apparition des dégradations

Dans ce domaine, le principe des **lois de survie** a été retenu ; cette méthode déjà appliquée en France [BRILLET, 1995] consiste, lorsque l'on recherche la loi d'apparition d'une dégradation, à distinguer plusieurs cas, pour une section donnée :

➤ La « censure à gauche » si la dégradation existe dès le premier relevé ;

➤ La « censure à droite » si la dégradation n'existe pas encore lors du dernier relevé disponible ;

➤ La « censure par intervalle » si la dégradation est apparue entre deux relevés.

Cette méthode permet d'exploiter tous les cas, même lorsque l'on ne connaît qu'un majorant (censure à gauche) ou un minorant (censure à droite) de l'âge où est apparue la dégradation.

L'« âge » peut être exprimé en temps réel (années) ou en trafic cumulé (nombre d'essieux équivalents à l'essieu type).

À titre d'exemple, la formule suivante a été déterminée à partir d'une analyse de la fissuration totale des chaussées souples, soit 430 sections (dont 70 censurées à gauche et 203 à droite) :

$$N_{10} = 10^{7,287 - 0,0067 * (SCI_{300}) - 2280264 * \left(\frac{1}{SCI_{300} * N_{10} Y} \right)}$$

avec :

N_{10} Trafic cumulé à l'apparition des fissures, exprimé en essieux équivalents,

SCI₃₀₀ Indice de courbure de surface en mètres (différence de déflexion entre les distances 0 et 300 mm du centre d'application de la charge),

N₁₀Y Trafic cumulé annuel.

Bien entendu, cette formule ne traduit que les résultats d'un calcul, et ne doit pas être appliquée sans précaution (d'ailleurs ses auteurs proposent des limites à son application) ; en particulier le nombre de décimales ne doit pas faire illusion !

Évolution des dégradations

Une première approche a été tentée sur les données des essais accélérés. Ainsi, la figure 2 montre ce que donne la comparaison de différentes lois pour une structure de chaussée souple expérimentée avec le manège de fatigue du LCPC. En abscisse figure le nombre d'essieux équivalents à partir de l'apparition des fissures et en ordonnée un pourcentage de fissuration résultant de l'addition de plusieurs types de fissures présentes dans les traces de roues.

On peut remarquer que l'évolution est proche d'une loi linéaire pour la partie centrale (entre 10 et 90 %), tandis que seuls les points correspondant à des états extrêmes s'en écartent.

Rappelons d'autre part que, s'il est relativement facile de caler des lois complexes lorsque l'on dispose de nombreux points pour une section donnée, cela devient beaucoup plus difficile lorsque l'on passe aux sections suivies en temps réel, pour lesquelles le nombre de points s'échelonne le plus souvent entre quatre et six, avant élimination des relevés sans dégradation. Si l'on ne retient que les relevés où la dégradation est présente, cela limite d'une manière drastique le nombre de sections « exploitables ». C'est la raison pour laquelle, dans un premier temps, l'exploitation des données a été faite par régression linéaire.

Orniérage

Pour l'évolution de l'orniérage, des essais accélérés ont été utilisés, comme on le voit sur la figure 3, qui montre l'évolution de la profondeur d'ornière en fonction du trafic équivalent cumulé, lors d'une expérience conduite sur le manège de fatigue suisse. La chaussée comporte une couche de 5 cm de grave stabilisée au ciment, recouverte de 8 cm d'enrobé bitumineux posé en deux couches (5 + 3 cm). Dès l'origine, sa portance était faible. Dans le cas présenté, l'orniérage observé est essentiellement d'origine structurelle.

Sur cet exemple, les lois linéaire et de puissance donnent des résultats voisins. On peut toutefois s'interroger sur l'évolution mesurée, et notamment sur le « changement de régime » autour de 600 000 essieux. L'étude n'a pas permis d'éclaircir totalement cette observation. Il faut sans doute retenir de cet exemple que si une loi linéaire peut donner une indication moyenne acceptable pour l'ingénieur, elle ne peut rendre compte précisément des évolutions individuelles, généralement marquées par une grande diversité des vitesses d'évolution.

Uni

Dans ce domaine, aucune donnée de type accéléré n'était disponible (même s'il peut être mesuré, l'uni n'y est guère représentatif d'un cas réel), ce qui n'a pas permis d'affiner la recherche d'une loi : dans ces conditions, la loi linéaire a été retenue, avec comme variable explicative l'âge en années. Les résultats font apparaître, comme le montre la figure 4, de très faibles coefficients d'évolution, sauf pour la Grèce.

Un tel résultat pose d'ailleurs la question de la signification de l'IRI (International Roughness Index (Indice d'uni international)) : seule la Grèce a utilisé la méthode de calcul fondée sur l'étalonnage d'un appareil « de type réponse » (Bump Integrator), alors que tous les autres pays ont calculé l'IRI directement à partir d'un appareil de type profilomètre (l'APL dans la cas de la France et de la Belgique).

Les enseignements et perspectives

Comme dans d'autres actions de ce type, l'objectif final était ambitieux (proposer des modèles d'évolution applicables à la gestion de l'entretien des routes pour toute l'Europe), mais les moyens mis en œuvre étaient forcément limités par trois considérations :

- Mettre à profit les programmes de suivi existants,
- Définir une grille commune pour les données,
- Conclure dans un délai limité (deux ans).

Dans ces conditions, ce qui restera du travail accompli reflétera, selon notre opinion, le franchissement de points de blocage (comme la définition d'un langage commun en matière de dégradations), la mise en commun d'un savoir-faire (en analyse statistique, modélisation, etc.) et la mise en évidence de différences entre pays d'Europe, tant dans la vision des problèmes que dans le comportement des chaussées.

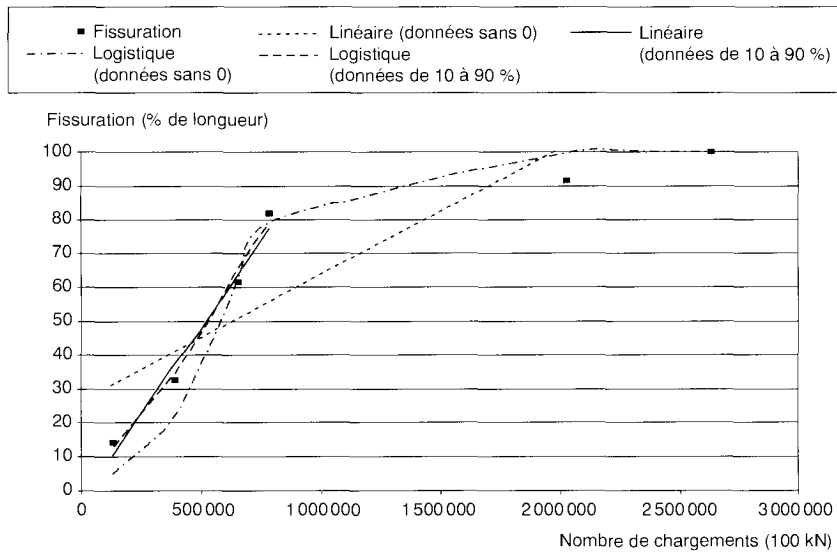


Fig. 2 - Exemple de recherche d'une loi d'évolution des fissures (sur une structure souple du Manège de Fatigue du LCPC).

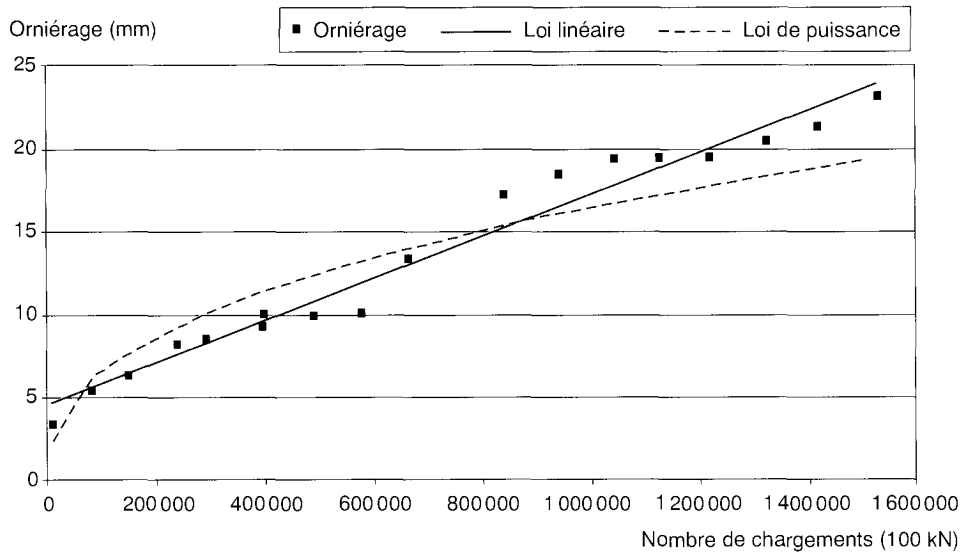


Fig. 3 - Exemple de recherche d'une loi d'évolution des ornières (sur une structure souple du Manège de Fatigue suisse).

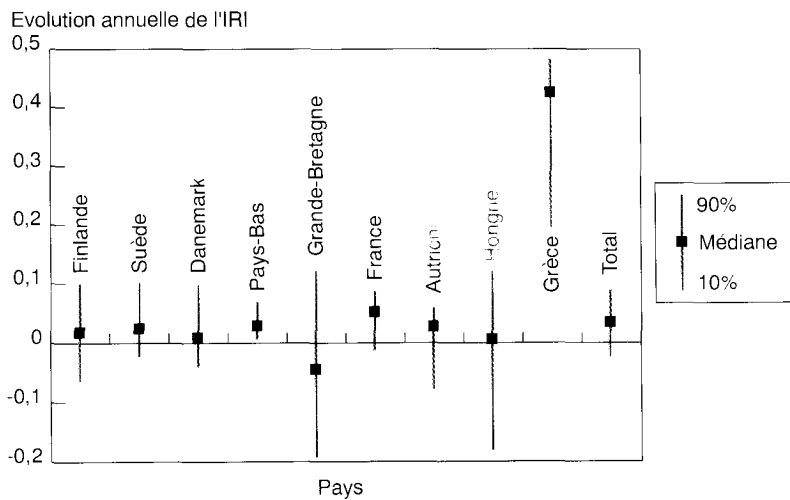


Fig. 4 - Coefficients d'évolution de l'IRI pour les chaussées souples des pays participants (médiane et intervalle de confiance à 80 %).

Les ombres au tableau peuvent être mises au compte d'une insatisfaction « quantitative » apparue lors de l'analyse : si celle-ci a permis de définir la forme des lois d'évolution, elle n'a pas débouché sur de véritables modèles directement utilisables sur tout le continent. Le principe de mise en commun de programmes existants, dont les objectifs et les ambitions n'étaient pas les mêmes, est apparu incompatible avec une couverture optimale de l'ensemble des cas traités. Un tel objectif aurait impliqué un plan d'expérience commun lancé conjointement dans les différents pays, avec en conséquence des moyens autrement plus importants et des délais autrement plus longs.

Il en résulte que, si l'on peut par exemple définir des tendances pour un sous-ensemble « France » ou « faibles trafics », la combinaison des deux critères n'est pas valide car il n'existe dans l'échantillon aucune route française à faible trafic.

En ce qui concerne le catalogue des données, le choix a été volontairement limité à ce qui existait (tel quel ou moyennant une « normalisation ») chez tous les participants, et qui correspondait à un objectif de « gestion » ; cela excluait par exemple la glissance (vu l'inexistence de la mesure dans certains pays, et l'impossibilité de se rattacher à une échelle commune) ou les paramètres de formulation des enrobés (qui ne sont pas disponibles dans un contexte de « gestion », mais qui auraient pu fournir l'explication de certains comportements).

En définitive, la réalisation technique du contrat peut être considérée comme un succès, les objectifs de fourniture de données, mise au point des méthodes de calage, d'analyse et de validation ayant été pratiquement tous atteints en quantité,

qualité et délais ; chaque pays y a apporté sa contribution, tant matérielle qu'intellectuelle.

En matière de progression des connaissances, l'objectif de production de modèles applicables à l'Europe entière a bien sûr été revu à la baisse, ce qui n'exclut pas de tirer des enseignements fort utiles à la poursuite des recherches, comme le montre la liste des « recommandations » exprimées dans les conclusions du rapport final. Si deux seulement des onze points évoqués sont affirmatifs quant à l'applicabilité des résultats (le point 3 sur la validation et le point 4 sur les données de dégradation proposent que ces méthodes soient érigées en standard pour les futurs développements), les neuf autres proposent de nouveaux axes de recherches visant à compléter le travail accompli :

- Nécessité d'adapter les modèles proposés aux conditions locales (point 1) ;
- Simplification des relevés de dégradations pour s'adapter aux conditions du suivi courant (point 2) ;
- Définition d'un indicateur d'uni adapté au suivi du réseau principal européen (point 5) ;
- Standardisation de la notion d'essieu équivalent (point 6) ;
- Prise en compte de la glissance et des émissions sonores (point 7) ;
- Introduction des chaussées rigides et des types nouveaux de chaussées souples (point 8) ;
- Incidence des séquences d'entretien sur le long terme (point 9) ;
- Plus grande part à accorder aux dégradations autres que la fissuration « classique » (point 10) ;
- Extension vers les routes à très faible trafic (point 11).

Remerciements

Les auteurs remercient les autres membres du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées qui ont pris une part active dans la réalisation du contrat PARIS, et plus particulièrement :

- *Rolf Kobisch, adjoint au Directeur du Laboratoire régional de Saint-Brieuc, qui a assuré la coordination des équipes chargées des relevés et mesures sur routes réelles, et la centralisation au niveau français des données correspondantes ;*
- *Jean-Pierre Kerzreho, ingénieur à la section Manège de Fatigue du LCPC, qui a réalisé la compilation des données résultant des essais accélérés ;*
- *Jean-Louis Gourdon, chef de la Division Matériaux et structure de chaussées, dont le travail accompli dans le groupe COST 324 a servi de base à nos actions dans PARIS et qui, avec son équipe, a assuré l'organisation à Nantes des réunions du groupe PARIS en juillet 1997.*

N'oublions pas non plus la contribution décisive à la genèse de ces actions fournie par Antoine Baucheron de Boissoudy, décédé en 1995.

- HRB (1961), *The AASHO road test*, Special report 61A-61E, Highway Research Board, Washington DC, 1961 (voir aussi le numéro spécial E du Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, mai 1966).
- SAYERS M.W., GILLESPIE T.D., PATERSON W.D.O. (1990), *Directives pour la mesure de l'uni des routes et l'étalonnage des appareils*, Document technique de la Banque Mondiale n° 46 F, Washington DC, juin 1990.
- OCDE (1991), *L'essai OCDE en vraie grandeur des superstructures routières, projet FORCE*, Conférence de La Baule, France, mai 1991.
- BERTRAND L., LEPERT Ph., (1993), *Relevé des dégradations de surface des chaussées*, Méthode d'essai LPC 38, LCPC, février 1993.
- LIVNEH M. et al., (1994), *On the repeatability and reproductibility of manual pavement distress surveys methods*, Third International Conference on Managing Pavements, San Antonio, 22-26 May.
- BRILLET F., (1995), Construction de lois d'évolution de l'état des chaussées par la méthode des lois de survie, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **197**, mai-juin 1995.
- FHWA (1996), *Long Time Pavement Performance (LTPP). Program Reference Guide*, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, McLean, Va, mars 1996.
- LEPERT Ph., SIMONIN J.-M., KOBISCH R., (1997), *Le FWD, performances, utilisation en France et en Europe*, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, **209**, mai-juin 1997.
- CCE (1997), Final report, COST action 324 *Long Term Performance of Road Pavements*, Commission des Communautés Européennes, Bruxelles, avril 1997.
- CCE (1997-2), Normalisation of Measured Distresses on European Road Pavements - Report, Performance Analysis of Road Infrastructure (PARIS), TRL, Londres, 25 July 1997.
- LEPERT Ph. (1997), Memento for Distress Codification, PARIS contract, LCPC, Nantes, July 1997.
- SWEERE G. et al., (1999), LTPP and PARIS : pavement performances analyses in North America and Europe, TRB annual meeting, janvier 1999.
- CCE (1999), Final report, PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure), Project, Commission des Communautés Européennes, Bruxelles.

ABSTRACT

European research: the PARIS contract (Performance Analysis of Road Infrastructure)

F. BRILLET, Ph. LEPERT

The PARIS contract (Performance Analysis of Road Infrastructure) brought together fifteen European countries with the aim of developing pavement time-damage models for maintenance management systems. This contract lasted for two years (from October 1996 to September 1998) and during this period the participants monitored reference sections. In the case of eleven of these sections previously collected « historical data » were also used. Data from accelerated tests (of the circular fatigue test type) were provided by France, Switzerland and Spain, but these were processed separately.

The paper describes the data used and the calibration method developed in order to use distress measurements based on different quantification methods. It presents a number of results from data analysis and outlines the further research which those involved considered necessary in order to produce reliable and widely applicable models.