

Le modèle HDM-III de la Banque mondiale

Résultats de recherches menées au LCPC

RÉSUMÉ

Le modèle HDM (Highway Design and Maintenance standards Model) de la Banque mondiale permet de procéder à des comparaisons technico-économiques, entre différentes stratégies d'entretien ou d'aménagement, en simulant sur de longues périodes le comportement des routes d'un réseau sous l'action du climat, du trafic et des travaux réalisés. La version étudiée de ce modèle est la version HDM-III, parue en 1987 sur PC. La diffusion par l'AIPCR de la version (HDM) vient de prendre le relais de HDM-II.

HDM-III a été largement utilisé partout dans le monde, tout particulièrement lorsqu'un financement par un bailleur de fonds était requis. L'article développe quatre des enseignements que le LCPC a tirés des utilisations qu'il a faites de HDM, à l'occasion de sa participation à des études réalisées par des bureaux d'études français, et des recherches menées pour son propre compte.

La première partie évalue l'influence relative des variables d'entrée dans le choix des stratégies optimales.

La deuxième partie cherche à cerner les limites d'utilisation du modèle, qui s'applique mal aux trafics faibles, pour lesquels l'incidence des coûts à l'usager devient négligeable dans le bilan économique global.

La troisième partie fournit une méthode de calage des coefficients d'évolution des chaussées, fondée sur une exploitation statistique des données d'un réseau.

La dernière partie montre les conséquences du calage sur les résultats, et souligne l'importance de cette opération délicate.

MOTS CLÉS : 10-60 - Trafic - Chaussée (trafic) - Entretien - Usager de la route - Coût - Économie - Statistique - Modèle mathématique - Banque mondiale - Réseau routier - Comportement - Système de gestion de chaussée.

François BRILLET
Ingénieur ENSCR
Chargé de recherches
Service d'Études et recherches internationales
Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Introduction

Au cours des années 1980 et 1990, les systèmes informatisés d'aide à la gestion des routes ont connu un grand développement, et le réseau des LPC s'est investi dans des recherches et développements répondant à cette attente. Citons l'appareil de saisie de données routières DESY [2], les méthodes de quantification des besoins en entretien VIZIR [3] et VIZIRET [4] [5], du système expert ERASMUS [6] et le logiciel de gestion de données VISAGE [7], comportant des sorties graphiques ou cartographiques (CARTEN et SILLAGE) ; plus récemment, sont apparus les outils de la gamme GiRR [8] (Gestion intelligente des Réseaux Routiers) : GiRR-Évalue pour la notation de l'état, GiRR-Stratège pour l'évaluation des stratégies et GiRR-Programme pour la programmation de l'entretien.

Pour le contexte spécifique des pays en développement, la Banque mondiale a élaboré, promu et finalement imposé son propre produit d'optimisation des stratégies de construction et d'entretien des routes, le modèle HDM. Celui-ci étant devenu incontournable dans son domaine, le SERI (Service des études et recherches internationales) du Laboratoire central des Ponts et Chaussées a travaillé à son intégration dans la gamme des outils méthodologiques et informatiques du réseau et de ses partenaires : c'est la raison d'être des recherches présentées ici.

Le modèle HDM [9] (*Highway Design and Maintenance Standard Model*, ce que l'on peut traduire par *Modèle pour les normes de conception et d'entretien des routes*) a été conçu d'abord pour calculer la **rentabilité des investissements routiers** ; à cette préoccupation s'est ajoutée celle d'une **optimisation des stratégies d'entretien**. Ceci explique la présence dans le modèle de lois de prévision à long terme (jusqu'à trente ans), pour simuler l'évolution des chaussées, en tenant compte des éventuels travaux d'entretien ou d'aménagement. Le principe de base du calcul économique consiste à **additionner les coûts supportés par le maître d'ouvrage** (construction et entretien

des routes) et ceux qui concernent les autres agents économiques, avec en premier lieu **l'usager de la route** (entretien du véhicule, consommation en carburant, coût du temps de parcours, etc.). Ainsi, la rentabilité d'un investissement routier ou d'une politique d'entretien est jugée en comparant le coût des travaux aux gains réalisés par l'usager, ces gains étant la conséquence d'un meilleur état de la route apprécié par **l'uni** et la géométrie.

HDM a déjà une longue histoire puisque les premières ébauches datent de 1970. Une telle longévité, rare dans le monde des programmes informatiques, est bien sûr associée à une évolution, qui a conduit des premiers concepts jusqu'aux produits finis HDM-II (1982), puis HDM-III (1987), et enfin HDM-4 dont la première version commence à être diffusée (il est à noter que la signification du sigle HDM change, devient désormais *Highway Development and Maintenance model*, et l'abandon du chiffre romain signale cette discontinuité).

À tous les stades du développement, le LCPC a été présent, comme acteur dans les recherches préliminaires ou comme utilisateur privilégié, ou encore dans la diffusion du produit dans le monde. Le lecteur trouvera le détail des recherches menées sur ce sujet de 1970 à 1991 dans un article paru au numéro spécial du *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées* consacré en 1994 à la gestion de l'entretien des chaussées [10]. Le présent article, qui en prend la suite, décrit des recherches réalisées au SERI de 1991 à 1995.

Le premier travail présenté avait pour but de répondre à diverses interrogations sur la fiabilité des réponses que donne le modèle HDM : parmi le grand nombre de données demandées, quelles sont celles sur lesquelles l'effort de précision doit porter en priorité, et quelle est la confiance que l'on peut accorder aux résultats finaux compte tenu de ces incertitudes ? La deuxième recherche prolonge la première, en posant la question de la gamme de trafic sur laquelle le modèle HDM fournit des réponses pertinentes.

Ces deux recherches ont été réalisées en grande partie dans le cadre de deux TFE effectués par le même étudiant, Jean Franck Grimaux, le premier en 1991 dans sa deuxième année à l'Institut universitaire de technologie (IUT) de Vannes (Département Traitement de données et statistiques), le second en 1993, dans le cadre d'une Maîtrise de sciences et technologie (MST) d'économétrie à l'Université de Rennes.

Le troisième sujet porte sur une méthodologie de calage des lois de prédiction de l'évolution de l'état des chaussées ; en effet, ces lois sont prédéfinies dans le modèle, et peuvent être adaptées par l'utilisateur en ajustant la valeur de coefficients prévus à cet effet. Cette recherche a utilisé les résultats de deux TFE effectués en 1994, l'un par Denis Leroux, élève de troisième année à l'École nationale des travaux publics de l'État (ENTPE), et l'autre par Stéphane Perrono, étudiant à l'IUT de Vannes (Département Traitement de données et statistiques).

Le quatrième sujet dérive du précédent, et permet de préciser les effets du calage. Ce sujet a été traité en 1995 (TFE de Marc Stock, élève de troisième année à l'ENTPE).

Notons que les résultats de ces recherches s'appliquent au modèle HDM-III dans sa version de 1989, et ne prennent pas en compte les améliorations apportées en 1995 concernant la saturation du trafic. De même, lors de la réalisation de ces travaux, la documentation liée à HDM ne comportait pratiquement aucune directive sur la manière de traiter les sujets visés ici ; depuis lors, cette lacune est comblée par un document spécifique [11] de la documentation HDM.

Étude de la sensibilité du modèle aux variables d'entrée

Le problème

À l'occasion des études menées à l'étranger par les laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC), des recherches et des actions d'enseignement, le LCPC a pu acquérir une connaissance solide du fonctionnement du modèle HDM-III. Il s'est inévitablement posé des questions sur ses modalités optimales d'application.

L'utilisateur de HDM-III constate dès l'abord que le modèle est exigeant en données, qui concernent des domaines très vastes :

- description du réseau, section par section (géométrie, climat, structure, portance, dégradations, uni, historique des travaux) ;
- opérations d'entretien (nature, coûts unitaires, effets sur la structure et l'uni, conditions d'application) ;
- description des véhicules (coûts unitaires, caractéristiques techniques, conditions d'utilisation, charges par essieu) ;
- volume, composition et croissance des trafics ;
- le cas échéant, coûts et avantages « exogènes » (non calculés par le modèle, mais introduits dans le bilan économique) ;
- définition des scénarios d'entretien et d'aménagements.

Même si le modèle prétend à l'universalité, son application à un nouveau contexte ne peut se faire sans précaution, d'où l'embarras des utilisateurs devant l'ampleur de la tâche. Heureusement, une expérience minimum jointe à une connaissance des lois contenues dans le modèle permet de faire un premier tri, et ainsi d'accorder aux données les plus importantes l'attention qu'elles méritent.

Afin de s'affranchir de l'aspect subjectif de cette démarche, le travail décrit ici a consisté à quantifier les variables les plus pertinentes, c'est-à-dire celles qui ont le plus d'effet sur les résultats finaux. Bien sûr, vu le nombre très élevé des entrées du modèle (même si l'on se limite à des stratégies d'entretien routier au sens strict, sans aucune amélioration géométrique ni construction nouvelle), nous avons dû agréger certaines

d'entre elles. Les différents composants des coûts d'utilisation des véhicules ont ainsi été étudiés comme s'il ne s'agissait que d'une seule entrée.

Les « variables » retenues sont les suivantes :

- l'uni, exprimé ici en IRI (International Roughness Index),
- l'indice structurel (SN = Structural Number),
- le trafic,
- le coût des travaux d'entretien de la route,
- le coût d'exploitation des véhicules (CEV).

Notons que le coût « d'exploitation » inclut en particulier le coût du temps passé par les passagers et les marchandises transportées, mais ignore d'autres aspects (accidents, nuisances, etc.).

Les données

Le LCPC a pu, au cours des études et recherches où il est intervenu, collecter des données de base correspondant à des contextes très divers. Pour pouvoir tirer de ce travail des conclusions générales, les données décrivant **les stratégies d'entretien ont été définies dans l'absolu**, sans référence à un contexte donné, afin de faire varier de nombreux paramètres ; de même, le « réseau » étudié est **un réseau fictif**, composé d'un certain nombre de cas types adaptés aux trafics considérés (seize « sections » correspondant à la combinaison de quatre états et quatre structures). En revanche, **les coûts unitaires de travaux et la description des véhicules sont issus d'études réelles** effectuées dans cinq différents contextes : département français du Finistère (recherche menée en 1989 sur l'applicabilité du modèle dans un pays industrialisé [10]), Corée du sud (étude LCPC-BCEOM-Sam Woo, 1987) [12] [13], Maroc (Coopération, 1990), Gabon (étude LCPC-Transroute, 1985), État de Santa Catarina au Brésil (échanges dans le cadre d'un groupe OCDE, 1991).

Sur la base de ces données, les simulations avec HDM mettent en œuvre cinq stratégies types pour l'entretien des chaussées : *zéro* (stratégie de référence, ne comportant aucune intervention sur les chaussées, qu'on laisse se dégrader), *réparations* (rebouchage des nids de poules et des fissures larges, dans la limite de 100 m²/km/ an), *enduits* (application d'un enduit général si plus de 10 % de la surface sont dégradés), *enrobés 1* (rechargement en 5 cm de béton bitumineux si l'uni atteint ou dépasse un IRI de 4,5), *enrobés 2* (même stratégie, mais avec un seuil plus bas, IRI de 3).

Exploitation des résultats

Pour juger de l'efficacité économique des stratégies étudiées, HDM calcule plusieurs indicateurs, le plus pertinent en la matière étant **le bénéfice actualisé** d'une variante par rapport à une solution de base :

$$BA_{a,v} = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{C_{bi} - C_{vi}}{(1 + 0.01 \times a)^{i-1}}$$

où :

$BA_{a,v}$ est le bénéfice actualisé de la variante v par rapport à la solution de base, calculé avec le taux d'actualisation a,

C_{bi} est le coût total (comprenant le coût de l'entretien et le coût d'exploitation des véhicules) à l'année i pour la solution de base,

C_{vi} est le coût total (comprenant le coût de l'entretien et le coût d'exploitation des véhicules) à l'année i pour la variante v,

N est le nombre d'années de la simulation, et

a est le taux d'actualisation, exprimé en pourcentage.

Chacune des cinq stratégies a été appliquée sur l'ensemble du « réseau », pour les cinq contextes et cinq niveaux de trafic, soit 10, 30, 100, 300 et 1 000 véhicules par jour, avec un taux de croissance géométrique annuel de 4 %. Le bénéfice actualisé (avec un taux d'actualisation de 12 %) qui en résulte a fait l'objet d'une régression multiple « pas à pas », en fonction des trois variables uni (IRI), indice structurel (SN) et trafic, sous les formes suivantes : valeur brute, carré, produits mutuels, produits par le coût moyen du véhicule-kilomètre (CEVM), produits par le coût unitaire des travaux (enrobé, enduit ou réparation selon la stratégie).

La régression pas à pas consiste à rechercher une formule de prévision de la forme :

$$y = a_0 + \sum a_i \times x_i$$

où « y » est la variable « expliquée » (ici, le bénéfice actualisé), « x_i » les différentes variables « explicatives » définies ci-dessus. Le « pas à pas » consiste à éliminer les interactions non significatives, et à retenir les plus fortes.

TABLEAU I
Répartition des variances

	Enrobés 1 (%)	Enrobés 2 (%)	Enduits (%)	Réparations (%)
Uni	1,9	2,3	2,6	1,9
SN	0,7	0,8	1,9	3,0
Trafic	28,4	26,6	24,6	21,5
Carré du trafic	0,3	0,0	0,3	0,5
Produit uni-trafic	12,1	12,5	8,2	3,9
Produit SN-trafic	2,0	2,2	4,9	7,9
Produit Uni-CEVM	3,5	0,0	4,0	3,7
Produit SN-CEVM	0,5	0,0	0,7	0,6
Produit trafic-CEVM	6,8	9,5	7,8	8,1
Produit uni-travaux	2,3	3,9	3,6	7,5
Produit-SN-travaux	1,0	1,5	1,3	1,2
Produit Trafic-travaux	20,7	19,5	16,7	17,5
Résidu	19,8	21,3	23,6	22,9

Le tableau I contient le « taux de variance expliquée » correspondant à chaque variable explicative retenue par la régression pas à pas, pour chacune des quatre stratégies (lorsque la variable n'est pas retenue, ce taux est bien sûr nul). Le total des pourcentages de variance expliquée est égal à 100 % moins celui du « résidu » qui correspond à la variance « non expliquée » : plus ce résidu est faible, plus le pouvoir prédictif de la formule sera fort. Ces résultats sont représentés sur la figure 1.

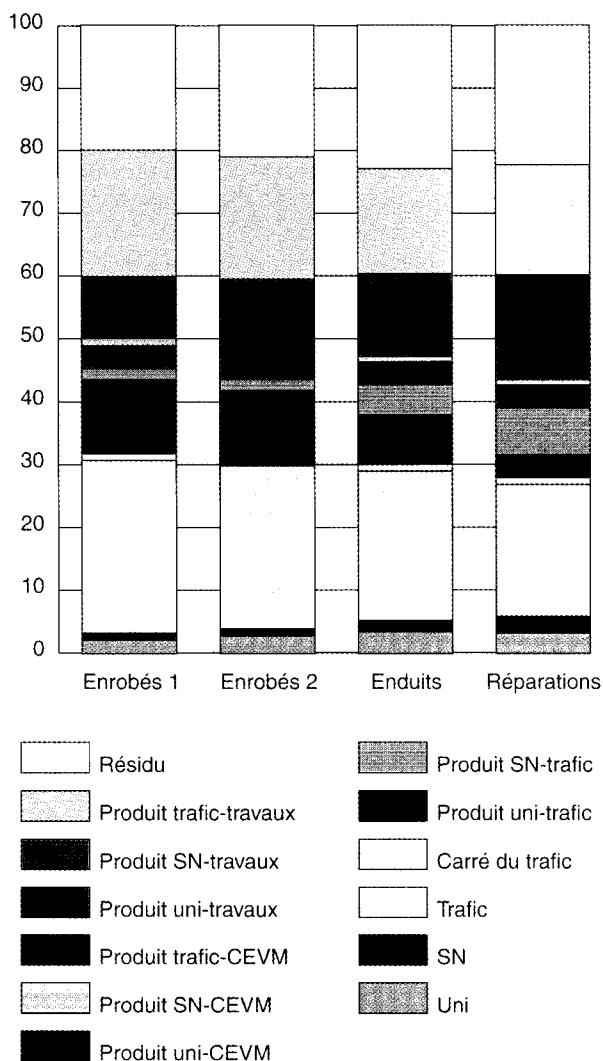


Fig. 1- Pourcentages de variance expliquée.

Plus le pourcentage de variance expliquée est fort, plus la variable a d'influence sur le résultat ; notons cependant que les variables « d'origine » (par exemple le trafic) peuvent intervenir plusieurs fois, par le biais des carrés et des produits. Si l'on examine les différentes stratégies, on trouve toujours le même classement pour l'importance des variables :

- le trafic vient toujours en tête avec 22 à 29 % pour sa contribution « pure » et 55 à 67 % si l'on intègre les produits du trafic avec une autre variable ;
- ensuite vient le coût unitaire des travaux (22 à 26 % avec les produits) ;
- puis vient l'uni (17 à 20 % avec les produits) ;

- puis le coût à l'usager (11 à 12 % avec les produits) ;
- enfin la structure de chaussée (3,5 à 10 % avec les produits).

Remarquons que les variables d'état autres que l'uni n'ont pas été distinguées ici ; en effet, l'uni constitue dans HDM la variable globale d'état, les autres indicateurs (comme la fissuration) jouant le rôle de variables intermédiaires.

Ce classement s'explique assez bien, le trafic intervenant d'une manière multiplicative dans les avantages procurés par un meilleur entretien ; les coûts unitaires à l'usager ont aussi un effet multiplicatif, mais de manière moins directe, ainsi que le coût unitaire des travaux pour les dépenses d'entretien. D'où l'intérêt de bien connaître les **trafics** (en volume mais aussi en croissance), ainsi que tous les **coûts unitaires** des travaux et des véhicules. Pour les descripteurs de l'état d'une chaussée, la conception du modèle fait qu'il priviliege l'**uni** par rapport à l'état de la **structure**, ce qui en fait un outil tout à fait inadapté pour optimiser le dimensionnement des chaussées et des renforcements, alors que le « D » de « Design » (Conception) pourrait laisser croire le contraire.

Gamme optimale de trafic pour l'application du modèle

Le problème des très forts et très faibles trafics

La deuxième recherche présentée ici concerne la gamme de validité du modèle en matière de trafic, c'est-à-dire les seuils en deçà desquels, et au-delà desquels, le modèle ne fournit plus de réponse pertinente.

Pour la limite supérieure, aucune approche véritablement quantitative n'a été tentée, mais on connaît assez bien les raisons pour lesquelles le modèle n'est pas adapté à l'étude des liaisons à fort trafic ; parmi les raisons citées, on trouve :

- les problèmes de saturation, qui font que, pour les forts trafics, les vitesses de déplacement et les coûts d'exploitation des véhicules calculés par le modèle deviennent moins réalistes, et ceci d'autant plus que le contexte est urbain ou périurbain ;
- les types de structures de chaussées qui, pour les trafics élevés, s'écartent notablement de celles qui ont servi de base à la détermination des lois de comportement contenues dans le modèle ;
- les préoccupations des maîtres d'ouvrage, qui s'intéressent davantage aux conditions d'écoulement du trafic (fluidité, confort, sécurité) qu'au coût de fonctionnement des véhicules.

Il est donc difficile de fournir une réponse chiffrée, une limite de l'ordre de 10 000 véhicules par jour étant généralement admise pour des contextes non urbains. Notons que, parmi les améliorations apportées par les nouvelles versions du modèle, figure la prise en compte des interactions entre véhicules.

Pour la limite basse, le problème ne se pose pas en termes de validité des relations à l'intérieur du modèle, mais plutôt en termes de pertinence de l'analyse économique. On peut considérer que le bénéfice actualisé est la somme de deux composantes :

- l'une liée aux coûts d'entretien des routes, qui dépend assez peu du trafic pour une stratégie donnée ;
- l'autre liée aux coûts subis par les usagers (CEV), où le trafic intervient comme facteur multiplicatif.

Si le trafic n'est pas supérieur à un seuil (qui dépend du contexte local), les avantages sur les coûts d'exploitation des véhicules seront toujours insuffisants pour contrebalancer le coût des travaux.

La figure 2 illustre cette tendance. Pour une section, on a comparé, pour différents niveaux de trafic, une stratégie à base de rechargements périodiques avec une stratégie sans entretien. On observe que les surcoûts d'entretien (courbe bleue) sont pratiquement insensibles au trafic, alors que les économies en CEV (courbe rouge) croissent fortement avec le trafic. Le bilan global fait apparaître un seuil au-delà duquel la stratégie est économiquement rentable, aux environs de 100 véhicules/jour dans le cas présenté.

Pour ce niveau de trafic, fréquemment rencontré dans les pays en développement, l'analyse économique

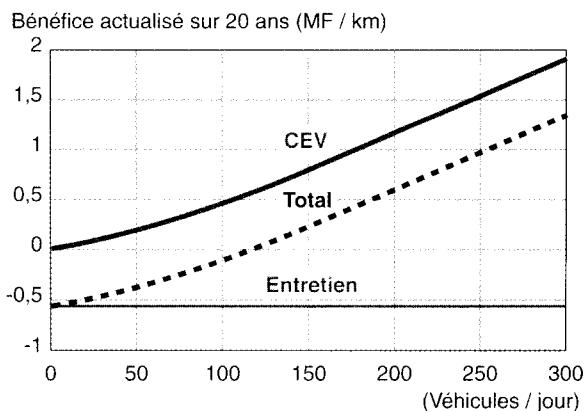


Fig. 2 - Exemple d'évolution des bénéfices, en fonction du trafic en TMJA (moyenne du contexte « France » pour la stratégie « enrobés » comparée à la stratégie « zéro »).

stricte de HDM conduirait à abandonner tout entretien. L'intérêt économique d'un entretien minimal est donc à chercher ailleurs que dans la réduction des coûts d'exploitation des véhicules, par exemple en valorisant les notions d'aménagement du territoire, de désenclavement, etc.

TABLEAU II
Résultats du calcul : rapports entre coût d'exploitation des véhicules et coût d'entretien des chaussées

Stratégie	Trafic MJA	Contexte				
		France	Corée	Brésil	Gabon	Maroc
Réparations	10	6,52	0,00	0,00	0,00	1,76
	30	9,06	0,00	1,36	0,00	5,63
	100	28,81	3,60	3,85	10,00	18,44
	300	80,48	9,38	10,80	31,67	52,94
	1 000	155,92	20,62	27,58	81,05	117,50
Enduits	10	0,15	0,03	0,01	0,02	0,04
	30	0,25	0,09	0,06	0,04	0,11
	100	0,84	0,36	0,24	0,16	0,43
	300	3,44	1,28	0,86	0,53	1,70
	1 000	16,88	6,81	4,51	2,48	8,97
Enrobés 1	10	0,15	0,03	0,02	0,02	0,05
	30	0,22	0,10	0,05	0,05	0,12
	100	0,71	0,33	0,17	0,16	0,46
	300	2,52	1,13	0,56	0,51	1,58
	1 000	10,35	4,88	2,39	2,07	6,94
Enrobés 2	10	0,12	0,03	0,01	0,02	0,04
	30	0,18	0,08	0,04	0,04	0,10
	100	0,55	0,27	0,14	0,13	0,37
	300	1,91	0,91	0,46	0,41	1,24
	1 000	7,70	3,80	1,89	1,62	5,28

Évolution des différents coûts en fonction du trafic

Selon les principes déjà décrits (données réelles pour les coûts et les véhicules, appliquées à un réseau fictif), le modèle HDM-III a été appliqué pour cinq stratégies, cinq contextes et cinq niveaux de trafic (10, 30, 100, 300 et 1 000 véhicules par jour).

Sur ces bases, les coûts d'entretien correspondant aux différentes stratégies ont été calculés, ainsi que les gains en coûts d'exploitation des véhicules par rapport à la stratégie zéro (qui consiste à ne réaliser aucune opération d'entretien). Ces montants n'ont évidemment aucun intérêt en valeur absolue, car l'échelle choisie pour chaque contexte dépend de l'unité monétaire ; en revanche, le rapport entre ces deux montants peut fournir des indications intéressantes sur l'importance relative des coûts à l'usager, c'est pourquoi ils sont rassemblés dans le tableau II. Les disparités entre contextes peuvent être attribuées aux différences de coûts unitaires (y compris le coût du temps, qui est évalué à un niveau très fort en France et est négligé dans les autres cas) ; notons aussi que la consistance même des travaux peut ne pas être la même (cas des réparations).

Nous pouvons voir ainsi que, selon le cas considéré, le rapport entre gain (sur les coûts à l'usager) et dépense (coût de l'entretien) peut varier de moins de 0,01 jusqu'à 200 : au-dessous de 1, il faut trouver une autre justification pour des travaux d'entretien.

La figure 3 montre un exemple d'évolution du bénéfice en fonction du trafic (TMJA) : elle montre bien qu'au-dessous de 100 véhicules/jour l'ordre des valeurs correspond à celui des coûts d'entretien (les coûts subis par l'usager intervenant très peu) ; au-dessus de 100 véhicules/jour, les bénéfices deviennent positifs, avec un avantage croissant pour les stratégies les plus « riches ».

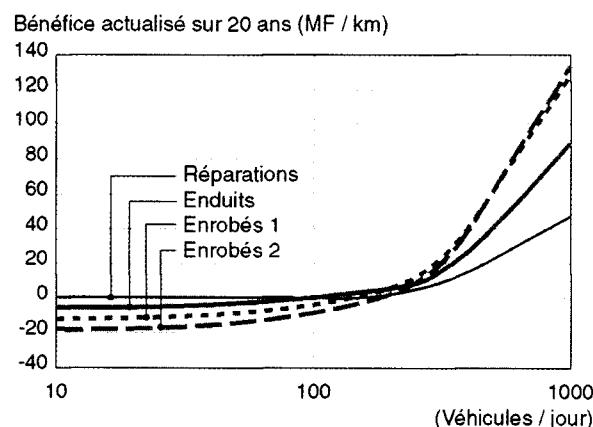


Fig. 3 - Évolution des bénéfices en fonction du trafic TMJA (France).

Calage des lois de comportement des chaussées

Les options choisies

Les lois d'évolution des chaussées contenues dans le modèle HDM-III ont été conçues pour s'appliquer par-

tout, et sept coefficients permettent à l'utilisateur de les ajuster ; l'application à un réseau nécessite donc un *calage* tenant compte des particularités du contexte.

Il existe ainsi un coefficient déterminant le temps écoulé avant l'apparition de la première fissure : si, par exemple (pour une structure et un trafic donnés) la formule du modèle donne cinq ans et que statistiquement la première fissure apparaît à six ans, il suffit de fixer à $6/5 = 1,2$ la valeur du coefficient (mais nous verrons que ce n'est pas toujours aussi simple !).

La méthode de calage la plus classique consiste à suivre sur plusieurs années un nombre limité de sections témoins, pour lesquelles on compare l'évolution réelle et celle résultant de la simulation. Cette approche a bien sûr deux inconvénients : elle demande une expérimentation longue et ne traite que d'un nombre limité de cas, qui peut être insuffisant pour une véritable démarche statistique.

C'est pour résoudre cette difficulté que l'approche développée ici a été mise au point. Elle consiste à utiliser un fichier issu d'une banque de données, et décrivant un certain nombre de sections de routes (le nombre optimal se situe entre 100 et 500), pour lesquelles on dispose de l'ensemble des données nécessaires au fonctionnement du modèle HDM (description de la section de route et données de trafic).

Sur chaque section, le calcul consiste à « remonter le temps », en partant du présent (année N), ou plus exactement de la date de recueil des données, à laquelle la route a un âge de n années. À l'année $N-n$, la route était neuve, et donc exempte de dégradations : à partir de cette situation, il suffit d'effectuer une simulation identique à celle de HDM sur les n années, qui nous ramènent à l'année N . La comparaison est alors possible entre la réalité observée (l'état relevé à l'année N) et l'état calculé à l'issue des n années de simulation (avant entretien). L'application de méthodes statistiques appropriées permet alors de dire si, à l'échelle du réseau, les prévisions sont conformes à la réalité.

Cette méthode peut donc se contenter d'une auscultation unique du réseau, contrairement à celle du relevé pluriannuel de sections témoins, et donne donc une réponse dans un temps très court ; les deux approches sont souvent qualifiées respectivement de *photo* ou *fenêtre étroite*, et *vidéo* ou *fenêtre large*.

En ce qui concerne le trafic, les valeurs sont calculées année par année de $N-n$ à N , sur la base des volumes à l'année N et des taux de croissance (appliqués rétroactivement), fournis par l'utilisateur pour chaque section et chaque classe de véhicules. Notons qu'une telle simulation implique la connaissance de l'état initial des chaussées (uni, déflexion) et de l'entretien qui y a été réalisé.

Nota : Ce type d'étude peut comporter un biais dû à la « survie des meilleurs » (une surface en mauvais état finit par être recouverte, et celles qui restent après un âge donné ne sont plus représentatives d'une population moyenne), ce qui peut nécessiter l'appel aux lois

de survie [14]. Cet effet a été négligé ici, ce qui est légitime si l'échantillon est suffisamment jeune ou les renouvellements de surface suffisamment espacés.

Le calcul

Le calcul présenté est effectué par un logiciel développé en interne pour le besoin de cette étude. Il traite chaque section avec le même calage puis détermine les statistiques sur l'ensemble :

- effectif (nombre de valeurs prises en compte),
- moyenne prédictive par le modèle,
- moyenne des valeurs observées,
- pente P_0 (estimation de la pente de la meilleure droite passant par l'origine des axes),
- pente a , ordonnée à l'origine b et coefficient de régression de la meilleure droite $ax + b$.

Pour les dégradations comportant un temps de latence (fissures, arrachements, nids de poule), apparaissent en outre :

- le nombre de cas où la dégradation a été observée,
- le nombre de cas où la dégradation a été prévue par le modèle,
- le nombre de cas où la prévision est conforme à l'observation,
- le χ^2 correspondant (plus cette valeur est proche de zéro, plus grande est la similitude des rapports présence/absence, respectivement pour les prévisions et les observations).

Optimisation des coefficients

Les variables d'état de la chaussée sont au nombre de sept :

- fissuration totale,
- fissuration large (plus de 3 mm d'ouverture),
- arrachements,
- nids de poules,
- orniérage,
- uni.

Le nombre de coefficients de calage est aussi de sept :

$K_{ci}, K_{cp}, K_{vi}, K_{pp}, K_{rp}, K_{gp}, K_{ge}$. Ils se rapportent aux phénomènes suivants :

- K_{ci} pour l'apparition des fissures,
- K_{cp} pour l'évolution des fissures,
- K_{vi} pour l'apparition et l'évolution des arrachements,
- K_{pp} (parfois appelé K_{ph}) pour l'évolution des nids de poules,
- K_{rp} pour l'évolution des ornières,
- K_{gp} pour l'évolution de l'uni due aux dégradations,
- K_{ge} pour l'évolution de l'uni due aux facteurs d'environnement (vieillissement).

Nous pouvons voir qu'un coefficient (K_{ci}) régit l'apparition d'un phénomène (la fissuration), en tant que multiplicateur du temps écoulé avant sa première manifestation ; les autres agissent sur les évolutions (sauf K_{vi} qui agit sur les deux), comme multiplicateurs de l'accroissement annuel de la variable. Le modèle fixe par défaut à 1 tous les coefficients.

HDMCAL							
CALCUL		Fichier HDMCOREE.TXT 104 enregistrements					
TEST		Fiss tota	Fiss larg	Arrach	Nids de p	Ornière	Uni (QI)
		Effectif	104	104	104	104	104
		Moy prév	24.08	19.39	0	0.05622	3.726
		Moy obs	18.62	8.76	3.808	0.04327	4.312
		Fente 0	0.8325	1.111	0	0.04039	0.6899
		Fente	0.508	0.6014	0	-0.04256	0.2401
		Ord orig	14.62	14.12	0	0.05806	2.691
		Régress	0.362	0.2521	0	-0.02123	0.2633
QUITTER		Degr obs	77	60	37	9	
		Degr prév	77	50	0	19	
		Bien clas	76	62	67	82	
		Chi-deux	0	3.852	0	6.44	

Fig. 4 - Exemple de résultats.

La figure 5 donne le schéma de la simulation, en indiquant où interviennent les différents coefficients. Les principales difficultés viennent de ce que :

- certains coefficients interviennent en plusieurs endroits du calcul ;
- les paramètres calculés sont tributaires des précédents (par exemple, les nids de poules sont déterminés par la fissuration et éventuellement les arrachements).

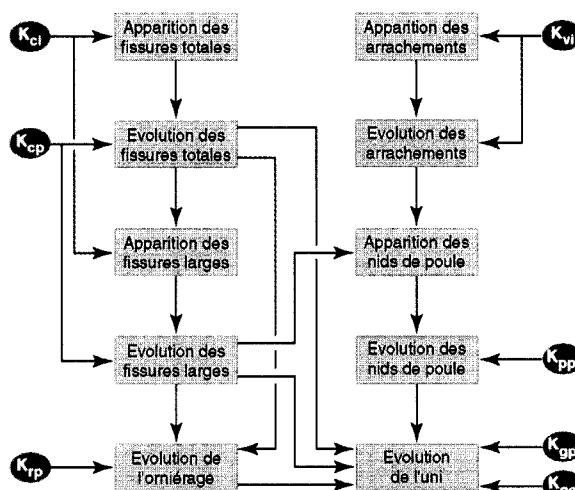


Fig. 5 - Principe de calcul des dégradations.

Il s'ensuit que les dégradations doivent être étudiées en séquence, conformément à l'ordre du calcul, avec la possibilité de retours en arrière si nécessaire ; des essais de type *boîte noire* (recherche automatique des coefficients par optimisation d'une seule variable comme l'uni) ont aussi été tentés, mais n'ont pas débouché sur une méthode applicable.

Ainsi, à défaut d'une procédure unique, la méthode retenue procède de quelques règles fondées sur la logique, le bon sens et l'expérience :

- ❶ Suivre l'ordre du calcul de HDM (apparition des fissures, évolution des fissures, etc., jusqu'à l'uni), avec possibilité de retour en arrière ;

❷ Pour l'apparition des fissures et des arrachements, rechercher la similitude des « profils » avec/sans dégradation (c'est le but du test du χ^2) ;

❸ Pour les évolutions, rechercher une valeur proche de 1 pour la pente de la régression $y = ax$ (sans constante) ;

❹ Faire plus confiance à la fissuration « totale » qu'à la fissuration « large » (l'appréciation des « 3 mm d'ouverture » étant sujette à interprétation) ;

❺ Préférer conserver la valeur 1 d'un coefficient plutôt que de retenir une valeur très éloignée mais douceuse.

Cette méthode a montré que, à la condition de disposer de la description complète d'un nombre suffisant de sections caractéristiques du réseau dans son état actuel, il est possible d'effectuer un calage des lois d'évolution permettant de reproduire le comportement passé du réseau. On admet que ce calage permet de projeter ce réseau dans le futur, en fonction des scénarios d'entretien proposés.

Influence du calage sur les résultats du modèle

Application de la méthode de calage

À l'issue du précédent travail, qui avait permis de proposer une méthode de calage des coefficients des lois d'évolution des chaussées, il était intéressant de savoir si les résultats ainsi obtenus pouvaient influer sur les conclusions tirées de l'application du modèle. En effet, si les conséquences du calage sont négligeables, autant s'en passer et utiliser les valeurs implicites ; *a contrario*, si leur effet est important, il convient d'en bien maîtriser l'application.

Pour apprécier cette influence, trois contextes ont été étudiés, respectivement celui du Brésil et de la Corée évoqués précédemment, plus un autre correspondant à un cas d'Afrique de l'ouest. Les données françaises et marocaines n'ont pas fait l'objet des mêmes dévelop-

TABLEAU III
Résultats du calage

Dégradation	Critère (*)	Afrique de l'ouest		Brésil		Corée (avec gel)	
		avant calage	après calage	avant calage	après calage	avant calage	après calage
Fissures totales	χ^2 P_0	25,04 1,90	0,00 0,93	0,00 0,89	(**) 107 0,91	0,00 0,88	(**) 4,1 0,87
Fissures larges	χ^2 P_0	46,82 2,74	40,58 1,11	23,00 1,05	1,70 1,12	3,90 1,22	2,50 1,15
Arrachements	χ^2 P_0	6,15 0,62	0,91 2,92	Non calé		Non calé	
Ornières	P_0	0,18	0,96	Non calé		0,68	0,93
Uni	P_0	0,84	1,00	0,99	1,00	0,86	0,99

(*) Un calage idéal correspond à $\chi^2 = 0$ et $P_0 = 1$.

(**) Cette « dégradation » du calage est due à la nécessité de caler simultanément les fissures totales et larges

gements, compte tenu des doutes pesant sur l'équivalence entre méthodes de relevé de dégradations, celles du Gabon non plus, à cause du faible nombre de sections pour lesquelles les données étaient disponibles.

Les applications « Afrique de l'ouest » ou « Brésil » sont tout au plus représentatives d'un seul État dans chaque cas, et les conclusions qui en sont tirées ne peuvent en aucune façon être étendues à tout l'ouest du continent africain ni à tous les États du Brésil (qui présentent une grande diversité de climat et d'état de développement économique).

Les résultats sont rassemblés dans les tableaux III et IV : notons que, pour l'Afrique de l'ouest, la valeur de 1 pour le coefficient K_{vi} (arrachements) résulte du calage, alors que la même valeur de 1 pour le coefficient K_{pp} (nids de poules) est un choix par défaut, le calage n'ayant pas donné d'optimum (tout comme pour la Corée). Pour la Corée, il existait deux jeux de données, l'un tenant compte du gel dans les régions froides du pays, l'autre non ; c'est le jeu « avec gel » qui a été retenu, ce qui est un argument *a posteriori* en faveur de la méthode originale utilisée à l'époque pour tenir compte du gel, en principe non modélisé par HDM-III.

TABLEAU IV
Coefficients de calage

	Afrique	Brésil	Corée
K_{ci}	0,45	0,80	0,90
K_{cp}	0,25	0,90	1
K_{vi}	1	1	1
K_{pp}	1	1	1
K_{rp}	2,50	1	1,20
K_{ge}	1	1	1
K_{gp}	0,45	1	1,30
Produit (*)	49,4	1,4	1,7

(*) Produit des coefficients (ou à l'inverse si le coefficient est inférieur à 1).

Il en ressort que ces applications conduisent à des calages dont le niveau d'importance varie :

- faible pour le Brésil,
- moyen pour la Corée,
- fort pour l'Afrique de l'ouest.

Comparaison des résultats

Le but du travail était d'estimer l'influence du calage sur les résultats finaux de HDM dans le cadre d'une étude réelle de comparaison de stratégies d'entretien. Pour cela, il importait d'appliquer HDM « sans calage » puis « avec calage », en utilisant les données de chaque étude. En revanche, afin de permettre la comparaison d'une application à l'autre, les **mêmes stratégies d'entretien** ont été appliquées, ce qui a bien sûr l'inconvénient de comporter parfois des solutions inadaptées au trafic (d'où certaines rentabilités très

négatives) ou même inusitées dans le pays (comme les enduits en Corée). Mais le but du travail n'était pas de refaire les études après calage. En dehors de ce point, toutes les données sont **réelles** et correspondent au contexte : structure, état et historique des chaussées, données sur les véhicules, coûts unitaires des travaux, volume et croissance des trafics, charges à l'essieu, etc.

Les résultats ont donné lieu à de nombreux développements statistiques, qui ne sont pas reproduits ici. En fait, l'analyse des résultats permet de répondre à deux questions :

- le calage modifie-t-il la **rentabilité** des solutions ?
- si oui, modifie-t-il le **classement** des solutions ?

C'est bien sûr la deuxième question qui intéresse le plus l'ingénieur routier, car la réponse aura des conséquences sur le choix des techniques.

La figure 6 montre que le calage très léger du Brésil ne modifie que faiblement les résultats de l'analyse économique, que le calage à peine plus important pour la Corée a des conséquences plus sensibles, enfin que le calage poussé du cas Afrique entraîne véritablement un bouleversement des résultats économiques.

La diminution des bénéfices avec calage du modèle dans le cas de l'Afrique s'explique par :

- l'apparition rapide des fissures (K_{ci} faible), qui entraîne un entretien précoce s'il est fondé sur les dégradations ;
- une faible évolution de l'uni (K_{ge} faible), d'où un moindre impact des coûts d'exploitation des véhicules.

Le tableau V met en évidence le bouleversement du rang de préférence des stratégies d'entretien fondé sur le bénéfice actualisé dans ce cas de l'Afrique de l'ouest.

Ceci montre, même si ce cas peut être considéré comme extrême, que le calage de l'évolution des chaussées est un élément indispensable à toute étude utilisant HDM dans le domaine de l'entretien ; l'application ultérieure à d'autres contextes nous a permis d'acquérir sur le sujet une grande expérience, qui est tout à fait en phase avec les directives établies récemment par les auteurs du modèle [11] (mais qui n'étaient pas connues à l'époque de nos travaux), en particulier : donner priorité aux coefficients d'apparition des fissures et d'évolution de l'uni, et privilégier l'absence de biais par rapport à la précision du calage.

Conclusion

Ce travail reflète l'attention accordée par le LCPC au modèle HDM. Les résultats des recherches permettent de mieux utiliser le modèle, en en connaissant les limites d'emploi et en cernant mieux ses modalités d'application. Les conclusions pratiques peuvent être résumées comme suit.

Les concepts sur lesquels est fondé le modèle HDM, et les modalités de leur mise en œuvre dans la version HDM-III, lui permettent d'apporter une aide pertinente

TABLEAU V
Exemple de classement des stratégies étudiées (Afrique, section 1)

Code	Réparation	Renouvellement de surface	Critère d'application	Effet du calage sur le bénéfice actualisé		
				Rapport après/avant	Rang avant	Rang après
ZERO	aucune	aucun		(*)	17	13
REPA	100 % NdP	aucun		0,21	10	1
ES12	100 % NdP	enduit	tous les 12 ans	0,11	8	6
ES10	100 % NdP	enduit	tous les 10 ans	0,11	6	6
ES08	100 % NdP	enduit	tous les 8 ans	0,09	5	10
ES05	100 % NdP	enduit	tous les 5 ans	0,04	7	12
EF50	100 % NdP	enduit	surf. dégr > 50 %	0,12	4	4
EF20	100 % NdP	enduit	surf. dégr > 20 %	0,10	3	8
EF10	100 % NdP	enduit	surf. dégr > 10 %	0,10	1	9
EF05	100 % NdP	enduit	surf. dégr > 5 %	0,08	1	1
B5U6	100 % NdP	enrobé 5 cm	uni IRI > 6	0,24	12	1
B5U5	100 % NdP	enrobé 5 cm	uni IRI > 5	0,22	11	1
B5U4	100 % NdP	enrobé 5 cm	uni IRI > 4	0,13	9	4
B5U3	100 % NdP	enrobé 5 cm	uni IRI > 3	(**)	13	14
B512	100 % NdP	enrobé 5 cm	tous les 12 ans	(**)	14	15
B510	100 % NdP	enrobé 5 cm	tous les 10 ans	(**)	15	16
B508	100 % NdP	enrobé 5 cm	tous les 8 ans	(**)	16	17
B505	100 % NdP	enrobé 5 cm	tous les 5 ans	(**)	18	18

(*) Zéro sur zéro ; (**) de positif devient négatif ; (***) reste négatif.

dans la détermination des stratégies optimales d'entretien routier pour des réseaux constitués de liaisons interurbaines supportant un trafic compris entre une centaine et quelques milliers de véhicules/jour. Lorsque l'on désire **comparer des stratégies d'entretien de routes revêtues supportant un très faible trafic**, l'appel à HDM s'avère moins utile : en effet, les gains pour les usagers ne suffisent pas à justifier un programme d'entretien même minimal, et le calcul économique se borne en fait à estimer et comparer les coûts d'entretien des solutions proposées. Le seuil à partir duquel l'approche HDM prend toute sa valeur (pour un réseau revêtu) se situe en général autour de 100 véhicules par jour, mais dépend bien sûr du contexte (rapports entre coût d'usage des véhicules et coûts unitaires de l'entretien, techniques disponibles, etc.). En outre, l'entretien des routes à faible trafic peut être justifié par bien d'autres considérations que le coût à l'usager, comme par exemple les impératifs d'aménagement du territoire, mais chiffrer de tels « gains » sort du domaine de l'ingénieur spécialiste des chaussées. Pour les trafics plus élevés, la non prise en compte dans HDM-III des interactions entre véhicules représente un inconvénient certain, qui est désormais en principe levé par la version HDM-4.

Si l'on se demande **quelles variables d'entrée de HDM ont l'influence la plus grande** sur les résultats,

c'est le trafic qui arrive en premier, car il possède à la fois un effet multiplicatif sur les gains à espérer quant aux coûts de transport, qui se révèlent constituer la part prépondérante du bilan économique global, et une influence importante sur le rythme de dégradation des chaussées : les coûts unitaires liés aux véhicules et aux travaux ont aussi leur importance, car ils déterminent les variables économiques. En ce qui concerne l'état de la chaussée, c'est l'un qui apparaît comme le facteur principal. Il ne faut cependant pas oublier la quantification structurelle de la chaussée (déflexion ou indice structurel), qui conditionne son évolution et donc le déclenchement de renforcements qui pèsent lourdement dans les bilans économiques et budgétaires.

Afin d'utiliser des lois représentatives du comportement réel des chaussées dans un contexte donné, le LCPC a développé une **méthode de calage des lois d'évolution contenues dans HDM**. Cette méthode permet de valoriser le contenu d'une banque de données routières grâce à un ajustement statistique des données acquises dans le cadre normal d'une étude de réseau, sans nécessiter de suivi pluriannuel comme c'est le cas dans la méthode traditionnelle.

Enfin, si l'on se pose la question de **l'utilité du calage des lois d'évolution**, la réponse apportée par ces recherches est positive. En effet, même si les lois implicites du modèle peuvent fournir des réponses tout à fait

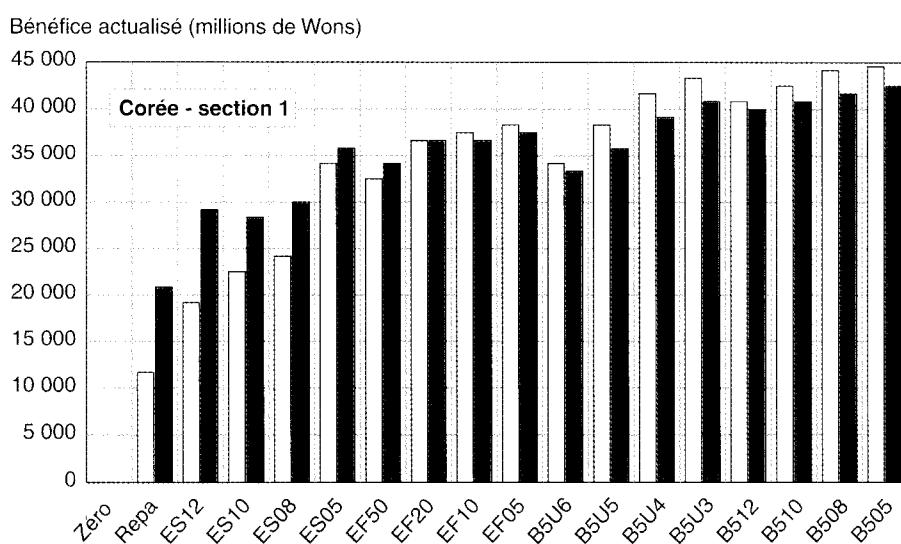
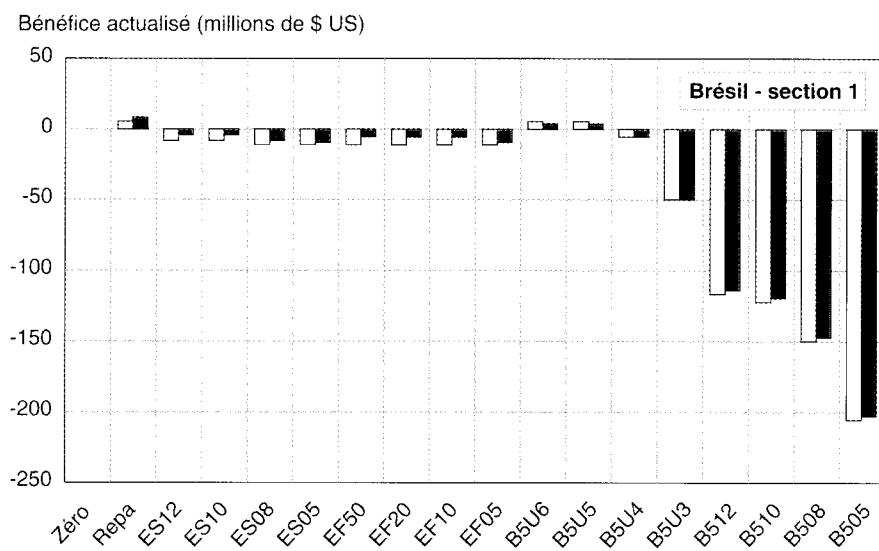
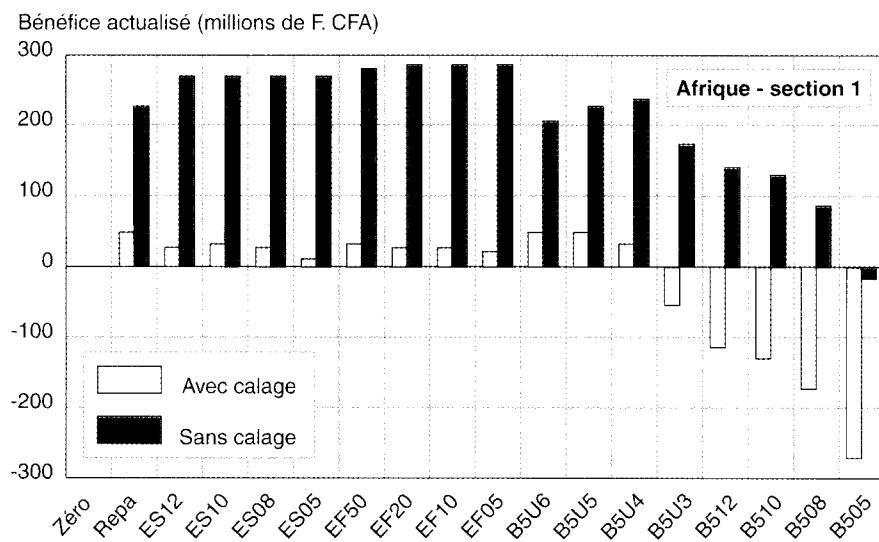


Fig. 6- Comparaison entre bénéfices pour une section.

correctes, il faut encore pouvoir le vérifier ; *a contrario*, si ces lois ne s'appliquent pas, les conclusions sur la rentabilité des stratégies d'entretien peuvent être très éloignées de la réalité, et donc conduire à des décisions injustifiées.

Tous ces résultats concernent bien sûr HDM-III. Mais ces conclusions restent pertinentes vis-à-vis d'HDM-4 ; en effet, la conception du modèle reste globalement la

même, malgré ses nombreuses extensions et la refonte totale de son interface avec l'utilisateur. D'ailleurs, la contribution du LCPC à l'évolution du modèle se poursuit : notre organisme était représenté dans le Comité de pilotage du projet HDM-4, est présent dans le groupe de travail AIPCR qui gère désormais le produit, collabore aux tests et participera à la diffusion et aux futures améliorations du nouveau modèle.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AUTRET P., BROUSSE J.-L. (1994), Développement de systèmes d'aide à la gestion de l'entretien à l'étranger, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **Spécial XVII**.
- [2] GUILLEMIN R. (1994), DESY 2000, système assisté par ordinateur pour la collecte, le traitement et la restitution des informations de gestion routière, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **Spécial XVII**.
- [3] AUTRET P., BROUSSE J.-L. (1994), VIZIR, méthode d'évaluation des chaussées souples, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **Spécial XVII**.
- [4] AUTRET P. (1997), Étude des routes non revêtues VIZIRET, système de gestion de l'entretien d'un réseau routier, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **210**.
- [5] AUTRET P. (1998), VIZIRET, qualification et quantification des dégradations d'une route non revêtue pour la programmation et le suivi des travaux d'entretien, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **213**.
- [6] JOUBERT P. (1994), ERASMUS, un système expert pour l'entretien des chaussées, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **Spécial XVII**.
- [7] LEMAIRE Y., NISSOUX J.-L. (1994), VISAGE, vers un système complet d'aide à la gestion de l'entretien des routes, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **Spécial XVII**.
- [8] FREITAS N., LEPERT P., RENAULT D. (1998), Aide à la gestion de l'entretien des réseaux routiers avec la gamme GIRR, *Revue générale des routes et aérodromes*, **765**, septembre.
- [9] The World Bank (1987), *The Highway Design and Maintenance Standards Model*, (version française - 1990 - par les Presses de l'ENPC).
- [10] AUTRET P., BRILLET F. (1994), Le modèle HDM-III de la Banque mondiale. Application à un département français, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **Spécial XVII**.
- [11] BENNET C.-R., PATERSON W.D.O. (2000), A Guide to Calibration and Adaptation, Volume 5, Série *Développement et Gestion des Routes*, AIPCR.
- [12] AUTRET P., CHOO S.-D. (1989), Mise en place d'un système d'aide à la gestion de l'entretien routier en Corée, *Bulletin des laboratoires Ponts et Chaussées*, **160**.
- [13] AUTRET P., BRILLET F., BROUSSE J.-L. (1991), *Réseau national coréen. Mise en place d'un système d'aide à la gestion d'un réseau routier*, Rapport ISTED.
- [14] BRILLET F. (1995), Construction de lois d'évolution de l'état des chaussées par la méthode des lois de survie, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **197**, mai-juin.