



Évaluation économique des chaussées à longue durée de vie

PHASE 1

Transports Transports Transports
Transports Transports Transports

Évaluation économique des chaussées à longue durée de vie

PHASE 1



ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

L'OCDE est un forum unique en son genre où les gouvernements de 30 démocraties œuvrent ensemble pour relever les défis économiques, sociaux et environnementaux, que pose la mondialisation. L'OCDE est aussi à l'avant-garde des efforts entrepris pour comprendre les évolutions du monde actuel et les préoccupations qu'elles font naître. Elle aide les gouvernements à faire face à des situations nouvelles en examinant des thèmes tels que le gouvernement d'entreprise, l'économie de l'information et les défis posés par le vieillissement de la population. L'Organisation offre aux gouvernements un cadre leur permettant de comparer leurs expériences en matière de politiques, de chercher des réponses à des problèmes communs, d'identifier les bonnes pratiques et de travailler à la coordination des politiques nationales et internationales.

Les pays membres de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, la Corée, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE.

Les Éditions OCDE assurent une large diffusion aux travaux de l'Organisation. Ces derniers comprennent les résultats de l'activité de collecte de statistiques, les travaux de recherche menés sur des questions économiques, sociales et environnementales, ainsi que les conventions, les principes directeurs et les modèles développés par les pays membres.

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les interprétations exprimées ne reflètent pas nécessairement les vues de l'OCDE ou des gouvernements de ses pays membres.

Publié en anglais sous le titre :

Economic Evaluation of Long-Life Pavements

Phase 1

© OCDE 2005

Toute reproduction, copie, transmission ou traduction de cette publication doit faire l'objet d'une autorisation écrite. Les demandes doivent être adressées aux Éditions OCDE rights@oecd.org ou par fax (33 1) 45 24 13 91. Les demandes d'autorisation de photocopie partielle doivent être adressées directement au Centre français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France (contact@cfcopies.com).

Avant-propos

L'OCDE regroupe 30 pays membres et aide les gouvernements à faire face aux défis d'une économie mondialisée. Le Programme de recherche en matière de transports routiers et liaisons intermodales (RTR), qui s'est terminé en 2003, s'organisait autour d'une approche de coopération parmi les pays membres de l'OCDE visant à traiter de questions liées au transport.

La mission du Programme RTR était de promouvoir le développement économique dans les pays membres de l'OCDE en améliorant la sécurité, l'efficacité et la durabilité des transports grâce à un programme de recherche en coopération sur les transports routiers et intermodaux qui produise des recommandations relatives à des options pour l'élaboration et la mise en œuvre de politiques efficaces de transports et qui favorise la vulgarisation pour les pays non membres.

Depuis le 1er janvier 2004, à la suite d'une décision du Conseil de l'OCDE et du Conseil des Ministres de la CEMT, le Programme RTR de l'OCDE et les activités de recherche économique de la CEMT ont été réunis pour créer le Centre conjoint OCDE/CEMT de Recherche sur les Transports.

Cette étude sur l'évaluation économique des chaussées à longue durée de vie : Phase I a été réalisée par un Groupe de travail de l'OCDE dans le cadre du Programme RTR 2001-03. Le rapport analyse sur les plans économique et technique les perspectives de développement et d'utilisation de couches de roulement à longue durée de vie pour les chaussées de routes à forte circulation. Sur la base d'une analyse économique, il tire des conclusions sur les conditions sous lesquelles des couches de roulement à longue durée de vie, qui ont un coût de construction initial plus élevé, peuvent être économiquement viables. Il identifie également les propriétés et performances nécessaires des matériaux ainsi que les types de matériaux envisageables pour ces couches de roulement.

Cette étude est publiée sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE.

Résumé analytique

Numéro ITRD* F100760

La plupart des pays disposant de réseaux routiers développés consacrent environ 50 % de leur budget routier à la construction de nouvelles routes. Le reste est essentiellement affecté à l'entretien et à la remise en état des routes existantes. Les méthodes et les matériaux de construction routière actuels contribuent à ce résultat, car ils entraînent des besoins d'entretien réguliers qui ne peuvent être satisfaits qu'à un coût relativement élevé.

Le projet relatif aux chaussées à longue durée de vie, approuvé par les pays membres, a pour objet de déterminer si les coûts d'entretien et de remise en état futurs ainsi que les temps d'attente qu'ils occasionnent ont atteint, sur les routes à forte circulation, un niveau justifiant d'un point de vue économique l'utilisation de chaussées à longue durée de vie. Pour qu'il en soit ainsi, il faudrait que la réduction des coûts d'entretien et des coûts associés (tels que les coûts pour l'usager) compense au moins l'accroissement des coûts de construction.

À partir de recherches internationales en coopération, ce rapport tire des conclusions sur la disponibilité de matériaux appropriés pouvant contribuer au développement de couches de surface à longue durée de vie pour chaussées routières. Il évalue l'intérêt économique d'un développement de ces chaussées pour les routes à forte circulation.

Le rapport présente des recommandations pour la réalisation d'un programme de recherche dans le cadre de la phase II du projet. L'objectif de ces travaux ultérieurs sera d'évaluer la capacité réelle des matériaux envisageables et leur aptitude à l'usage pour les couches de roulement à longue durée de vie.

Domaines : (61) Matériels et méthodes d'entretien, (30) Matériaux, (10) Aspects économiques et administration.

Mots-clés : calcul économique, chaussée, couche de roulement, durabilité, entretien international, matériau (construction), renouvellement de la surface de revêtement, réparation.

* La base de données de documentation internationale de recherche sur les transports (ITRD) de l'OCDE contient plus de 300 000 références bibliographiques d'ouvrages de recherche sur les transports. Elle s'étoffe chaque année de près de 10 000 références supplémentaires tirées des ouvrages publiés dans le monde entier sur les transports. C'est un outil puissant qui permet de recenser les ouvrages de recherche sur les transports à l'échelle mondiale. Chaque enregistrement contient un résumé informatif sur le document référencé.

Table des matières

Résumé	7
<i>Chapitre 1</i> Introduction	11
<i>Chapitre 2</i> Chaussées traditionnelles pour routes à forte circulation	19
<i>Chapitre 3</i> Cadres d'évaluation	31
<i>Chapitre 4</i> Viabilité économique des revêtements de chaussées à longue durée de vie ..	43
<i>Chapitre 5</i> Chaussées de nouvelle génération pour routes à forte circulation.....	61
<i>Chapitre 6</i> Conceptualisation : exigences techniques relatives à la couche de surface des chaussées à longue durée de vie et recommandations pour l'évaluation des solutions envisageables	81
<i>Chapitre 7</i> Résumé et conclusions	101
<i>Annexe A</i> Questionnaire – Chaussées souples	107
<i>Annexe B</i> Modèles de coûts du cycle de vie étudiés	113
<i>Annexe C</i> Application du modèle HDM-4.....	117
<i>Annexe D</i> Modèle PASI – Saisie de données et résultats	119
<i>Annexe E</i> Membres du groupe de travail sur l'évaluation économique des chaussées à longue durée de vie : Phase I	123
Glossaire	125

Résumé

Les gouvernements ont consacré des ressources considérables au développement de réseaux de transport de grande qualité, et en particulier de réseaux routiers, qui nécessitent ultérieurement un entretien approprié.

La plupart des pays disposant de réseaux routiers développés consacrent environ 50 % de leur budget routier à la construction de nouvelles routes. Le reste est essentiellement affecté à l'entretien et à la remise en état des routes existantes. Les méthodes et les matériaux de construction routière actuels contribuent à ce résultat, car ils entraînent des besoins d'entretien réguliers qui ne peuvent être satisfaits qu'à un coût relativement élevé.

Au cours des dernières années, l'innovation dans le domaine routier s'est concentrée sur les structures économiques et organisationnelles. Les changements dans les techniques de construction routière ont été beaucoup moins spectaculaires et, dans le meilleur des cas, n'ont été que graduels. Toutefois, pour optimiser les budgets routiers nationaux, les méthodes de coûts sur la durée de vie sont de plus en plus utilisées pour déterminer comment, où et quand dépenser au mieux les fonds budgétaires alloués à la construction et à l'entretien des routes. Dans ce cadre, l'évolution vers des contrats d'entretien intégral a permis de réduire les coûts et l'adoption de contrats à long terme a créé un contexte favorable au développement de types de chaussées plus durables.

Une enquête auprès des pays membres montre que les chaussées utilisées sur les routes à forte circulation sont en général rechargées tous les dix ans (en fonction des conditions locales). Dans la décennie suivante, elles peuvent être fermées pour travaux de réparation tels que les emplois partiels ou le scellement. En fait, les coûts de construction initiaux d'une chaussée sont souvent dépassés par les coûts d'entretien et d'exploitation du cycle de vie. Du point de vue du budget routier, les travaux d'entretien engagés dans les quelques années à venir peuvent paraître préférables à un accroissement des investissements actuels.

Cependant, outre les coûts d'entretien directs financés par les budgets des administrations routières, l'entretien des routes impose des coûts significatifs aux usagers. Sur les routes à forte circulation en particulier, les opérations d'entretien peuvent provoquer des encombrements et des perturbations de la circulation. En dépit des mesures prises lors des interventions d'entretien, les coûts pour les usagers sont souvent élevés et en augmentation. De ce fait, il s'exerce des pressions croissantes pour exiger des chaussées à longue durée de vie nécessitant un entretien minimal et pouvant ainsi éviter la majeure partie de ces coûts futurs pour les administrations et les usagers des routes.

Orientations futures

Dans la plupart des pays, les investissements dans les infrastructures routières ont généralement augmenté moins vite que le trafic routier. Si cette tendance se poursuit, elle aboutira à l'avenir à une intensification du trafic sur les réseaux routiers. Elle confirme la thèse selon laquelle le nombre et la proportion de routes à forte circulation vont augmenter, réclamant des chaussées plus durables à des coûts de construction plus élevés.

Objectifs du projet

Le projet relatif aux chaussées à longue durée de vie, approuvé par les pays membres, a pour objet de déterminer si les coûts d'entretien et de remise en état futurs ainsi que les temps d'attente qu'ils occasionnent ont atteint, sur les routes à forte circulation, un niveau justifiant d'un point de vue économique l'utilisation de chaussées à longue durée de vie. Pour qu'il en soit ainsi, il faudrait que la réduction des coûts d'entretien et des coûts associés (tels que les coûts pour l'utilisateur) compense au moins l'accroissement des coûts de construction.

Lors du développement d'une chaussée à longue durée de vie, il convient de prendre en compte les performances de l'ensemble de la chaussée, depuis la couche de fondation jusqu'au revêtement. Ce rapport traite de la couche de surface de la chaussée ; d'autres études sur les structures des chaussées à longue durée de vie sont en cours d'élaboration, mais ne concernent pas la couche de surface.

Conclusions économiques

L'analyse économique montre que le développement de nouvelles couches de roulement pour chaussées pourrait présenter un avantage économique considérable. Du point de vue du coût, un revêtement de chaussée à longue durée de vie trois fois plus cher qu'une couche de roulement traditionnelle serait rentable pour certaines routes à forte circulation. Cela dépendrait d'une durée de vie prévue de 30 ans, d'un taux d'actualisation de 6 % ou moins et d'un trafic moyen journalier annuel (TMJA) de 80 000 véhicules ou plus.

Des analyses de sensibilité ont été réalisées pour établir l'éventail des conditions dans lesquelles les revêtements de chaussées à longue durée de vie deviendraient rentables. Ces travaux ont évalué les effets des différents taux d'actualisation (3 % à 10 %), des volumes de trafic (TMJA de 40 000 à 100 000), de la durabilité (30 à 40 ans), du coût de la couche de roulement (triple ou quintuple), du pourcentage de poids lourds (5 % à 20 %) et des calendriers d'entretien de jour ou de nuit. Les détails sont indiqués dans ce rapport.

Ces hausses des coûts de la couche de roulement doivent être envisagées dans le contexte des coûts habituels de construction de chaussées. Pour le projet choisi en exemple d'une autoroute à deux fois 3 voies, les coûts de construction de la chaussée s'élèveraient entre USD 1.8 million et USD 2.25 millions par kilomètre de chaussée. Cette estimation comprend des postes tels que les terrassements, le drainage, le marquage,

les barrières de sécurité, etc. Elle ne comprend pas les autres infrastructures telles que les ponts ou les tunnels, les portiques, etc.

À l'heure actuelle, la couche de surface (couche de roulement) de ces chaussées représente entre 9 % et 12 % des coûts indicatifs de construction de chaussées, mentionnés plus haut. Un triplement du coût de la couche de roulement entraînerait une augmentation du coût global de construction de la structure de la chaussée pouvant atteindre 24 % ; la couche de surface représenterait alors environ 30 % des coûts de construction.

Bien entendu, le coût total de construction des routes à forte circulation varie considérablement en fonction non seulement des coûts de construction de la chaussée, mais aussi du nombre de ponts, de tunnels et de terrassements nécessaires. Le coût global moyen par kilomètre de chaussée s'élève de USD 3.15 millions à USD 3.6 millions, si l'on prend en compte ces autres coûts. Un triplement du coût de la couche de surface de la chaussée a alors un impact inférieur sur le coût global de construction de l'autoroute par kilomètre (entre 10 % et 15 %) et la couche de surface ne représente qu'entre 5 % et 20 % du coût total de construction. Dans le cas d'un projet de route totalement nouvelle, ce pourcentage est même inférieur si le coût total comprend les ouvrages d'art, les acquisitions foncières, les coûts de conception et les communications.

Les couches de roulement à longue durée de vie pour lesquelles ces évaluations indicatives ont été faites ne sont pas encore d'un usage généralisé. Les modalités relatives à leur coût, leur durée de vie, leur état et leur entretien, incluses dans l'analyse des revêtements avancés, sont des objectifs supposés accessibles. Leur faisabilité technique fait l'objet des prochaines étapes de recherche dans le cadre de ces travaux.

Conclusions relatives aux matériaux des couches de roulement

Un examen des matériaux de chaussées avancées, actuellement en cours d'étude ou en service sur des projets à petite échelle, indique qu'il existe bien des matériaux susceptibles d'être rentables pour des revêtements à longue durée de vie répondant aux critères établis dans l'analyse.

Après l'examen des matériaux, l'étude a conclu que deux types de matériaux en particulier pourraient répondre aux exigences. Ils sont :

- *Bitume époxy*

Il existe de nombreux historiques de performances et données de terrain sur le bitume époxy, qui a été utilisé sur plusieurs tabliers de ponts. Il est à noter en particulier que le bitume époxy posé en 1967 sur le tablier du pont San Mateo aux États-Unis est encore en bon état.

- *Bétons à hautes performances avec couche de roulement en époxy*

En ce qui concerne les bétons à hautes performances (BHP), bien que toutes leurs données proviennent de recherches en laboratoire, leurs propriétés sont tout à fait remarquables, en particulier leurs propriétés de résistance et de flexion. Leurs

inconvénients éventuels, notamment la faible réduction du bruit et des projections d'eau, ainsi que les propriétés de frottement, peuvent probablement être surmontés par une amélioration de la macrotecture.

Une couche de roulement à longue durée de vie devra résister au trafic (et à sa croissance) sur une très longue période, ainsi qu'à des conditions environnementales variables. Une phase d'essais et de développement sera nécessaire pour déterminer les matériaux pouvant assurer de façon fiable une longévité sans entretien, dans les limites de coûts définies. Un examen des méthodes d'essais recensées dans ce rapport identifie les essais permettant de simuler le vieillissement et d'étudier les performances en matière de fissuration, de décollement, d'orniérage, d'arrachement et de polissage. La nécessité de réaliser des essais pour établir les performances de drainage et de bruit est également soulignée.

En résumé, à partir de recherches internationales en coopération, le rapport conclut qu'il existe des matériaux potentiellement disponibles pouvant contribuer au développement de couches de surface à longue durée de vie pour chaussées routières. En outre, s'il s'avère que ces matériaux ont les propriétés techniques nécessaires, il existera des arguments économiques importants en faveur du développement de ces chaussées pour les routes à forte circulation.

Le rapport présente des recommandations pour la réalisation d'un programme de recherche dans le cadre de la phase II du projet. L'objectif de ces travaux ultérieurs sera d'évaluer la capacité réelle des matériaux candidats et leur aptitude à l'usage pour les couches de roulement à longue durée de vie.

Chapitre 1

Introduction

Dans un contexte de réformes dans le secteur de la route, d'évolutions dans les stratégies de construction et d'entretien routier et de la mise au point de chaussées spécialement adaptées aux tabliers des ponts, des analyses économiques des chaussées à longue durée de vie se révèlent particulièrement pertinentes.

Le transport et la mobilité sont essentiels au développement économique et social. C'est pourquoi les pays développés ont consacré d'énormes ressources au développement de réseaux de transport de grande qualité, qui nécessitent un entretien approprié. Les méthodes actuelles de construction routière entraînent d'importants besoins en entretien, qui ne peuvent être satisfaits qu'à un coût très élevé. La croissance continue du trafic routier et des charges par essieu, ainsi que les pressions exercées pour maîtriser les dépenses publiques, poussent les administrations routières à proposer de nouvelles solutions. Dans le même temps, le coût économique des encombrements et des perturbations dus aux travaux effectués sur les routes à grande circulation a atteint un niveau inacceptable. On constate donc une demande croissante d'infrastructures routières à longue durée de vie nécessitant un entretien minimal.

Réformes du secteur routier

La dernière décennie a connu des changements majeurs dans les méthodes de travail des administrations routières de la plupart des pays de l'OCDE. Les gouvernements ayant souhaité que les coûts de l'offre de réseaux de transport soient régulés par le marché, le nombre d'agents de l'État chargés des interventions sur le terrain a diminué. Les administrations routières nationales sous-traitent de plus en plus fréquemment au secteur privé les opérations de conception, de construction (ou de remise en état) et d'entretien des infrastructures routières.

Avec le développement de ce phénomène, les contrats d'entretien à long terme d'une durée supérieure à 12 ou 15 ans sont devenus monnaie courante et de nombreuses administrations routières confient désormais les tâches de surveillance à des sociétés privées spécialisées. L'alternative traditionnelle entre le public ou le privé pour l'acquisition, l'exploitation et le financement des routes se voit complétée par de nombreuses formes intermédiaires, à mesure que les États tentent de réduire leur engagement financier dans l'acquisition et l'exploitation des infrastructures de transport.

Ce rétrécissement du rôle de nombreuses administrations routières a entraîné la restructuration de la plupart d'entre elles en organisations fondamentalement allégées.

Les agences dont le rôle principal, sinon unique, réside dans l’attribution et la gestion des contrats d’entretien, de construction et de savoir-faire, constituent une innovation récente.

La phase suivante consistera probablement dans la transformation des administrations routières en sociétés anonymes avec ou sans leur gouvernement pour actionnaire majoritaire. Toutefois, ces évolutions doivent être examinées d’un point de vue plus large. Une raison d’être de ces nouvelles structures est la contribution qu’elles peuvent apporter au financement des investissements et des dépenses d’entretien des infrastructures. Les péages virtuels, la tarification routière directe ou les autres sources de liquidités liées au trafic peuvent financer les activités de ces agences. Dans de telles circonstances, le rôle du gouvernement peut être davantage axé sur la réglementation de l’économie, de la sécurité et de l’environnement et sur la satisfaction des besoins de la collectivité à l’égard des services assurés par ces sociétés.

Il apparaît clairement qu’au cours des dernières années, l’innovation dans le domaine routier s’est concentrée sur les structures économiques et organisationnelles. Les évolutions technologiques ont été moins spectaculaires, à l’exception de quelques progrès notables dans l’informatique appliquée au trafic. Néanmoins, un des aspects positifs de l’évolution vers des contrats d’entretien intégral et de l’adoption de contrats à long terme est de pouvoir favoriser le développement de types de chaussées plus durables.

Valeur économique du patrimoine routier

L’infrastructure routière d’un pays représente une énorme valeur en capital, fruit de grands investissements sur plusieurs générations. La valeur économique de ce patrimoine est généralement égale au coût de reconstruction net d’amortissement de la totalité du réseau. Les coûts d’exploitation (ou le budget routier du pays) comprennent les coûts d’entretien, de remise en état et d’extension du réseau à un niveau répondant aux besoins de la société actuelle. Ces coûts, exprimés en pourcentage de la valeur du patrimoine, seront différents dans chaque pays en fonction de la politique du gouvernement et de l’état du réseau. Les coûts d’exploitation sont le reflet des quantités, de la qualité et de l’historique d’entretien actuels, ainsi que des charges de trafic actuelles et prévues à l’avenir. De ce fait, il n’existe pas de pourcentage type. Le tableau 1.1 indique les coûts constatés aux États-Unis. L’obligation de réduire les coûts d’entretien futurs de la valeur en capital du patrimoine est commune à tous les pays. Des chaussées à plus longue durée de vie contribueraient de manière significative à réduire ces coûts d’entretien.

Tableau 1.1. Valeur et coûts du réseau routier national aux États-Unis

Longueur totale des routes revêtues	1.6 million de kilomètres
Longueur des routes nationales	260 000 kilomètres (la plupart ont plus de 35 ans)
Montant manquant pour le maintien en l’état	11.3 milliards d’USD
Investissement annuel en béton bitumineux	15 milliards d’USD (500 millions de tonnes de béton bitumineux, 30 millions de tonnes de liant)

Source : United States Federal Highway Administration.

Orientations de la politique routière

Les problèmes d'encombrement sur les routes à forte circulation pendant les opérations d'entretien constituent actuellement une préoccupation majeure dans la plupart des pays. Différentes approches sont adoptées pour résoudre ce problème. Certaines agences se sont fixé des objectifs ; d'autres prennent désormais en compte le coût pour l'utilisateur dans la planification des travaux, ce qui a un impact significatif sur l'approche retenue. Les opérations d'entretien sont souvent programmées pendant les heures creuses, essentiellement la nuit, et les pressions sont de plus en plus fortes pour réaliser les travaux plus rapidement.

Les autres secteurs prioritaires de la politique routière sont l'environnement et la sécurité. La réduction du bruit est devenue une priorité pour certaines administrations et devrait prendre une importance croissante dans de nombreux pays à mesure que les normes deviendront plus sévères.

Intérêt pour les types de chaussées

Ce rapport s'intéresse à la couche de surface des chaussées, tout en reconnaissant qu'il est essentiel de prendre en compte l'ensemble de la chaussée, depuis la couche de fondation jusqu'au revêtement. Pour obtenir une couche de roulement à longue durée de vie, il ne suffit pas d'améliorer les propriétés de la couche de roulement en elle-même. Si les couches inférieures ne sont pas convenablement conçues et construites, elles perdront leur résistance structurelle (liée aux charges de trafic, aux variations de température, à la pénétration d'eau et aux cycles de gel/dégel), ce qui réduira la durée de vie de la couche de roulement, indépendamment du fait que cette dernière ait été convenablement conçue et construite. La couche de roulement est un élément important, interdépendant de l'ensemble de la chaussée. Une couche de roulement durable et sans défauts protège les couches de base contre la pénétration des eaux de pluie, ce qui est essentiel pour maintenir sa résistance et sa durée de service.

Au stade de la conception de la couche de roulement, plusieurs critères techniques s'ajoutent à celui de la durée de service. Les propriétés de frottement et de drainage sont essentielles pour prévenir les accidents en assurant un freinage efficace, en limitant la perte de visibilité due aux projections d'eau en conditions humides et en réduisant le risque d'aquaplanage en cas de pluies fortes ou prolongées. Des surfaces de chaussées à texture ouverte ont été développées pour améliorer le drainage superficiel. Elles ont généralement une durée de service plus courte en raison de l'exposition accrue du liant bitumineux à l'oxydation et de la perte progressive de granulats qui en résulte sur la surface de la chaussée.

Ces dernières années, l'utilisation de couches de roulement peu bruyantes s'est généralisée sur les routes à forte circulation, à proximité des zones d'habitation. Ces chaussées peuvent réduire le bruit de 6 décibels (dB) et peuvent remplacer ou compléter les murs antibruit. Toutefois, la durée de service des chaussées antibruit actuelles (dont l'effet est dû à une structure à forte teneur en vides) peut être très courte (de 6 à 8 ans). Leur avantage quantifiable est de réduire les coûts des autres mesures antibruit

nécessaires pour appliquer les réglementations nationales en matière de limitation du bruit.

Ces exemples montrent que des normes plus strictes concernant le drainage et le bruit des chaussées tendent à devenir la règle. Il est essentiel que les propriétés des nouvelles couches de roulement à longue durée de vie correspondent au moins aux bonnes pratiques actuelles puisqu'elles devront servir pendant de nombreuses années.

Champ du projet (définition du type de route)

Bien que la recherche de chaussées à longue durée de vie doive porter, dans l'idéal, sur tous les types de routes, il existe d'autres facteurs que la durabilité qui limitent la durée de service d'une couche de roulement.

Une résistance insuffisante entraînant une déformation de la couche d'assise est une cause fréquente de dégradation prématurée de la couche de roulement. Ce phénomène est typique des routes supportant un trafic plus intense que celui pour lequel elles ont été conçues. Il n'est pas sûr que ces routes puissent recevoir un nouveau type de chaussée relativement coûteux sans subir auparavant une remise en état totale leur assurant la résistance structurelle nécessaire pour supporter le trafic actuel et prévu à l'avenir.

Les routes abritant des réseaux de services publics (égouts, conduites d'eau, câbles électriques et lignes téléphoniques), comme la plupart des rues des grandes agglomérations et des routes des banlieues résidentielles, subissent de fréquents travaux de terrassement, de remblaiement et de réfection de chaussée. Les couches de roulement à longue durée de service ne seraient donc pas adaptées à ces voies.

Le champ du projet est ainsi limité aux routes présentant une résistance structurelle compatible avec le trafic supporté et n'abritant pas de réseaux de services auxquels les propriétaires ont un droit d'accès privilégié. En outre, pour justifier le coût d'une chaussée à longue durée de vie, les coûts du temps perdu par l'utilisateur pendant les opérations d'entretien seraient probablement élevés. Le champ est donc limité aux routes enregistrant un trafic important et en augmentation.

Travaux en cours des autres organisations internationales

Il existe un grand nombre d'autres projets internationaux connexes, achevés récemment ou en cours de réalisation. Leurs résultats ont été intégrés, dans une certaine mesure, aux travaux du groupe lorsqu'ils pouvaient influencer sur les phases ultérieures du projet. Ils sont énumérés ci-dessous :

- Le projet du Groupe européen des chaussées à longue durée de vie (ELLPAG) : « Faire le meilleur usage des chaussées à longue durée de vie en Europe ».
- Les projets de l'Union européenne FORMAT, relatif à l'optimisation de l'entretien routier, et COST action 324, relatif aux performances à long terme des chaussées routières.
- Le travail de l'Association mondiale de la route (AIPCR) relatif à l'évaluation des coûts sur la durée de vie et aux systèmes de gestion du patrimoine.

Les deux premiers projets sont encore en cours. Leurs objectifs sont brièvement décrits ci-dessous.

ELLPAG, groupe d'experts du Forum des laboratoires européens de recherche routière (FLERR/FEHRL) a été mandaté par la Conférence européenne des directeurs des routes (CEDR) pour lancer un projet de recherche sur le thème « Faire le meilleur usage des chaussées à longue durée de vie en Europe ». Ce projet comprend plusieurs phases et son objectif à long terme est d'élaborer un guide des bonnes pratiques, facile à consulter, sur la conception et l'entretien des chaussées à longue durée de vie pour tous les types courants de construction de chaussées utilisés en Europe. Pour justifier ces travaux, ELLPAG explique que « dans de bonnes conditions socioéconomiques, l'utilisation d'une conception de chaussée à longue durée de vie peut être clairement envisagée comme une solution pérenne au problème de l'offre de réseaux routiers efficaces, sûrs et durables dans les pays européens... ..les travaux proposés sont très complémentaires de ceux du projet spécial OCDE/RTR... » [en faisant référence à ce projet]. Alors que le projet de l'OCDE est essentiellement axé sur la longévité et les aspects économiques des couches de roulement, le projet européen ELLPAG met l'accent sur les couches d'assise. La phase 1 du projet ELLPAG, qui a débuté en septembre 2003, est achevée et les travaux portent maintenant sur l'examen des chaussées semi-rigides, dans le cadre de la phase 2. Cette deuxième phase des travaux devrait être achevée vers la fin de l'année 2004.

FORMAT vise à améliorer l'efficacité et la sécurité des réseaux routiers en fournissant les moyens de réduire le nombre, la durée et l'ampleur des travaux routiers destinés à l'entretien des chaussées. La recherche porte également sur la réduction des temps d'attente et, par conséquent, des coûts pour les usagers qui abordent les zones de travaux. Pour atteindre ces objectifs, les principaux aspects de la planification et de la réalisation des opérations d'entretien des chaussées seront optimisés dans un ensemble de procédures d'entretien des chaussées totalement intégrées et applicables. Quatre thèmes clés concernant l'entretien des chaussées routières constituent l'objet de ces recherches : surveillance de l'état des chaussées, techniques d'entretien, sécurité dans les zones de travaux et aux alentours, et analyse coûts/avantages. C'est ainsi que FORMAT et le présent projet ont pour objectif commun de limiter les coûts globaux d'entretien des revêtements de chaussées routières et que leurs résultats pourraient réduire le champ d'utilisation des chaussées à longue durée de vie, qui ne nécessitent pas d'entretien, mais sont aussi plus coûteuses.

Objectifs du projet

Le résultat attendu de ce projet est la mise au point de nouveaux revêtements de chaussées à longue durée de vie. À l'heure actuelle, les chaussées constituées de liants bitumineux ou hydrauliques dominent le marché. Elles sont utilisables dans une grande variété d'intensités de trafic et de conditions climatiques et présentent peu d'inconvénients pour l'environnement.

Toutefois, bien que des produits de qualité soient disponibles, la plupart des chaussées présentent des défauts en matière de durabilité, de confort pour l'utilisateur, de résistance et de besoins en réparation. Cela se traduit par une mauvaise économie de

l'entretien alors que ces chaussées doivent relever le défi d'une hausse des limites de poids des véhicules et de la densité du trafic sur les grands axes routiers, dès aujourd'hui et dans un avenir proche.

Il est bien connu que plusieurs types de liants synthétiques (seuls ou comme agents modifiants des liants traditionnels) peuvent offrir des chaussées très durables, peu bruyantes et résistantes à l'usure, assurant une bonne protection de la couche d'assise et pouvant être mises en œuvre dans un délai très court et avec une perturbation minimale du trafic. Jusqu'à présent, ces matériaux ont été presque exclusivement utilisés sur les ponts, pour lesquels des coûts initiaux plus élevés sont facilement justifiés par une durée de vie plus longue et une meilleure protection de la structure. Toutefois, compte tenu de leurs caractéristiques, ces matériaux devraient également être envisagés pour des applications beaucoup plus larges, sur les routes à forte circulation.

Actuellement, la recherche industrielle en matière de chaussées est axée sur les liants traditionnels en raison, d'une part, du coût des liants avancés et, d'autre part, de la réticence des administrations routières à accepter des coûts initiaux plus élevés pour obtenir des durées de service plus longues. C'est pourquoi il est peu probable que l'industrie repousse de sa propre initiative les frontières de l'innovation autant qu'il est souhaitable afin d'utiliser tout le potentiel technologique des matériaux actuels pour l'amélioration des chaussées routières. Cette situation pourrait évoluer si les analyses démontrent, en tenant compte de la durée totale de service, que les propriétés des nouveaux liants peuvent intéresser un marché très vaste et en expansion.

Une meilleure compréhension des chaussées pour routes à forte circulation a abouti récemment au concept de chaussées à longue durée de vie ou perpétuelles. Au sens large, cette expression désigne les couches d'assise et non les couches supérieures de roulement ou de surface. La nécessité de construire une structure à longue durée de vie est explicitée dans d'autres projets en cours. Le présent projet s'attache donc particulièrement aux aspects économiques des couches de revêtement à longue durée de vie.

Les objectifs du projet sont les suivants :

- Identifier l'orientation de la politique des administrations routières dans la gestion et le financement des infrastructures routières.
- Examiner le cadre d'évaluation pour déterminer la viabilité économique d'une utilisation à grande échelle de ces chaussées, sur les routes à forte circulation.
- Résumer et consolider les connaissances acquises sur les nouveaux liants pour chaussées dans les infrastructures routières.
- Établir les propriétés fonctionnelles et environnementales de ces liants dans les chaussées pour des applications à grande échelle.
- Planifier et préparer la réalisation de projets de démonstration appropriés.

Ce projet s'articule en trois phases : Phase I : viabilité conceptuelle ; Phase II : développement conceptuel ; Phase III : essais en vraie grandeur.

La **Phase I**, viabilité conceptuelle, est l'objet de ce rapport :

- Le chapitre 2 décrit les performances des chaussées traditionnelles, actuellement en service.
- Le chapitre 3 étudie les cadres d'évaluation utilisés pour estimer la viabilité économique des chaussées.
- Le chapitre 4 examine la viabilité économique des revêtements de chaussées à longue durée de vie.
- Le chapitre 5 passe en revue les matériaux et méthodes de construction potentiels pour les chaussées à longue durée de vie.
- Le chapitre 6 porte sur les exigences techniques relatives à la couche de surface des chaussées à longue durée de vie et sur les recommandations pour l'évaluation des solutions envisageables.

La **Phase II**, développement conceptuel, recouvre trois activités :

- Tâche 5 : Conception, essais en laboratoire.
- Tâche 6 : Essais de chargements accélérés.
- Tâche 7 : Techniques et méthodes de construction.

La **Phase III**, essais en vraie grandeur, sera réalisée par les pays membres. Le groupe du projet de l'OCDE collaborera pour planifier les essais.

Chapitre 2

Chaussées traditionnelles pour routes à forte circulation

Différents types de chaussées ont été élaborés dans les pays afin de tenir compte des diverses conditions climatiques locales, des niveaux de trafic et de financement et des gestionnaires. Ce chapitre décrit brièvement les couches de roulement types existantes, traditionnellement construites sur les routes à forte circulation. L'objectif est double. En premier lieu, ces informations permettront d'effectuer une analyse comparative entre les couches de roulement traditionnelles existantes et les nouvelles couches de roulement à longue durée de vie (chapitre 4). En deuxième lieu, il s'agira d'étudier les nouveaux matériaux et les performances potentielles des couches de roulement à longue durée de vie (chapitre 5). Les informations de ce chapitre serviront de référence pour évaluer les performances réalisables avec les méthodes de revêtement traditionnelles. Les performances des nouveaux matériaux pourront être comparées à cette référence.

Un questionnaire a été élaboré pour obtenir des informations sur les chaussées traditionnelles existantes (voir annexe A). Il a été essentiellement orienté vers les chaussées bitumineuses traditionnelles. Toutefois, quelques informations sur les chaussées en béton ont également été recueillies. Douze pays ont répondu : Canada, Danemark, États-Unis, Finlande, France, Hongrie, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Royaume-Uni et Suède.

Des informations supplémentaires ont été obtenues à partir d'études récentes : AIPCR (2002), Transportation Research Board (2001, 2002) et Direction générale de l'Énergie et des Transports de la Commission européenne (1999).

Le questionnaire a été conçu pour obtenir des informations techniques et économiques sur les pratiques des agences concernant les revêtements, et notamment la couche de roulement. Les informations demandées ont été limitées aux chaussées à forte circulation (TMJA d'au moins 10 000 véhicules, avec plus de 15 % de poids lourds). Il a été supposé que les matériaux, la construction et le drainage utilisés permettraient d'obtenir une capacité structurelle importante (c'est-à-dire, que la structure de la chaussée aurait une longue durée de vie, avec prévision d'entretien périodique et de renouvellement de la couche de roulement). Les propriétés de la couche de roulement (durée de vie prévue, coûts initiaux, épaisseur, matériaux et méthodes de dimensionnement) ont pu alors être isolées et analysées indépendamment des propriétés de la structure générale ou des couches inférieures.

Les agences ont été priées de répondre sur la base de projets spécifiques, réalisés récemment. Il a été prévu de pouvoir définir et utiliser un type et des performances moyens lors de l'analyse.

Coûts initiaux et stratégies d'entretien

Le tableau 2.1 montre les coûts initiaux des matériaux de la couche de roulement, les épaisseurs types, la durée de vie prévue, les stratégies d'entretien et les durées de fermeture à la circulation. Les types de mélanges existants ou les nom génériques des mélanges utilisés pour identifier les mélanges dans chaque pays, sont notés. C'est la principale source d'informations utilisée dans l'analyse comparative entre les chaussées traditionnelles ou existantes et les chaussées avancées de haute technologie, décrites au chapitre 5.

Les coûts initiaux comprennent les coûts des matériaux, du malaxage, du transport, de la mise en œuvre et de la gestion du trafic pendant les travaux. Ce sont les coûts tout compris de l'offre du maître d'œuvre pour les travaux, ne comprenant pas des postes tels que la conception, la surveillance des travaux en régie ou autres coûts accessoires du projet. En outre, ces coûts ne concernent que la couche de roulement et non les couches structurelles inférieures ou les travaux de préparation détaillés, préalables au revêtement. Cette définition permet d'exclure autant de variables inutiles que possible tout en obtenant des données suffisantes pour une analyse comparative. Tous les coûts sont exprimés en dollars américains (USD) par mètre carré de couche de roulement.

Outre les coûts initiaux et la durée de vie prévue, les informations économiques nécessaires à l'analyse concernent les stratégies et les coûts d'entretien, les calendriers et les durées de fermeture à la circulation pour travaux d'entretien. Les données sur les valeurs résiduelles n'ont pas été recueillies dans le cadre de cette analyse, car souvent les pays ne détiennent pas ces informations.

Les coûts de la main d'œuvre ont une grande influence sur les coûts de construction initiaux et varient énormément d'un pays à l'autre. Il n'a pas été tenté de normaliser les coûts initiaux des chaussées en raison de la diversité des coûts de la main d'œuvre. Seuls la moyenne et les écarts de valeurs signalés sont présentés. Les coûts moyens de la main d'œuvre nécessaire à la pose des chaussées avancées ont été utilisés dans ce rapport, pour l'analyse économique comparative. Les analyses de cas nationaux spécifiques sont laissées au soin des administrations compétentes.

Le tableau 2.1 montre les informations suivantes :

- L'asphalte coulé gravillonné (SMA) est le mélange pour couche de roulement le plus souvent cité. Il a donc été utilisé comme principal indicateur des types et coûts habituels des mélanges pour couches de roulement.
- Les épaisseurs varient entre 25 et 50 mm. Les coûts initiaux vont d'environ 3.50 USD à 15.60 USD par mètre carré.

Tableau 2.1. Coûts initiaux et stratégies d'entretien des couches de roulement

Pays	Coûts initiaux (USD/m ²)	Épaisseur (mm)	Durée de vie prévue couche de roulement (années)	Stratégie d'entretien	Années	Coûts (en km de voie)	Durée de fermeture à la circulation (jours)	Notes
Canada								
1.	5.50	50	15	Scellement de fissures	2,9,15	1 000	0.2	Superpave
				Scellement de surface				
2.	5.25	50	15	/recyclage à chaud sur place	12	20 000	2	Mélange cl.1
				Fraisage et remplacement	15	30 000	1	
				Scellement de fissures	2	1 000	0.2	
				Emplois partiels	10	10 000	1	
3.	3.00	40	15	Scellement de surface				Enrobé dense
				/recyclage à chaud sur place	12	20 000	2	
				Fraisage et remplacement	15	30 000	4	
				Scellement de fissures	3,9,15	1 000	1	
				Emplois partiels	9,15	8 000	1	
				Fraisage et remplacement	19	73 000	1	
Danemark								
1.	5.30	20	14	Scellement de fissures	8	1 000	0.33	TB (couche mince)
				Emplois partiels	10,13	3 000	0.33	
				Rechargement	14	20 000	1	ACG
				Scellement de fissures	8	1 000	0.33	
2.	9.50	35	14	Emplois partiels	10,13	3 000	0.33	
				Fraisage et remplacement	14	35 000	1	
États-Unis								
1.	4.90	50	18	Scellement de fissures	3			BB Minnesota
				Scellement de surface	8	3 500	0.04	
				Rechargement	18	20 000	1	ACG
				Scellement de fissures	5,10	2 000	1	
2.	5.60	50	10	Fraisage et remplacement	10	27 000	2	Colorado
				Scellement de fissures	20	320 000	10	
3.	35.00	320	30	Broyage	20	240 000	10	Béton Floride
				Rechargement	30			
Finlande	5.00	40	5	Fraisage et remplacement	5	20 000	0.5	
France								
	3.00	25	16 (8 voie poids lourds)	Scellement de fissures	5		1	
				Thermorégénération (voie poids lourds)	8			
				Fraisage et remplacement	16			
				Emplois partiels	3	100	0.5	
Hongrie	8.00	40	7	Emplois partiels	5	200	0.5	ACG
				Rechargement	7	100 000	1	
Norvège	6.70	35	5	Fraisage et remplacement	5	24 300	1	ACG
Pays-Bas								
1.	10.60	50	15	Fraisage et remplacement (voie poids lourds)	9	65 000	0.8	BBDR (construction)
				Fraisage et remplacement (toutes voies)	15	86 000	0.8	
2.	15.60	50	15	Fraisage et remplacement (toutes voies)	15	86 000	0.8	BBDR (remise en état)
Pologne								
1.	6.94	40	10	Rechargement mince	10	20 000	0.5	ACG
				Fraisage et remplacement	20	26 000	0.75	
2.	9.20	50	10	Rechargement mince	10	24 000	0.4	BB
				Fraisage et remplacement	20	32 000	1	
Portugal								
	3.44	40	15	Scellement de fissures	3,6,12	2 600	2	ACG
				Fraisage et remplacement	15	16 000	1	
Royaume-Uni								
1.	6.61	25	9	Scellement de fissures,	8,9			ACG
				Fraisage et remplacement				
2.	8.61	30	9	Scellement de fissures	8	2 000	0.5	
				Fraisage et remplacement	9	34 000	0.4	
3.	9.50	30	9	Fraisage et remplacement	9,27	20 000	0.5	
				Fraisage et remplacement	18,35	33 000	1	
Suède								
1.	3.00	20	9	Fraisage et remplacement	9	15 000	1	TSK couche mince
				Scellement (sdi)	9	4 000	0.2	
2.	6.00	40	13	Fraisage et remplacement	13	30 000	2	ACG

ACG = Asphalte coulé gravillonné.

Source : D'après les réponses au questionnaire de l'OCDE.

- Pour les autres types de mélanges, les épaisseurs varient beaucoup plus largement, entre 20 mm et 50 mm. Cette dernière valeur est signalée pour de nombreux types de mélanges différents. L'épaisseur de la couche de roulement a une influence sur le prix, les couches les plus minces s'avérant moins chères que prévu. L'épaisseur du mélange peut être limitée à 20 mm pour les couches de roulement minces au Danemark et en Suède.
- Les coûts initiaux en Europe occidentale sont légèrement plus élevés que dans les pays nordiques et en Amérique du Nord. Certains des facteurs expliquant ces différences ont déjà été exposés. Toutefois, le taux de change USD-EUR a varié de quelques 20 % au cours du projet. Les comparaisons sont donc uniquement approximatives. Les coûts indiqués dans les tableaux ont été exprimés en USD au cours de décembre 2002 (le taux de change moyen était alors de USD 1 \approx EUR 0.98).
- En Finlande et en Norvège, les coûts initiaux des mélanges d'une épaisseur supérieure à 30 mm sont légèrement moins élevés qu'en Europe occidentale. Ils varient entre 5.00 et 6.70 USD.
- Les mélanges d'Amérique du Nord comprennent le Superpave et l'asphalte coulé gravillonné, ainsi que les types de mélanges traditionnellement utilisés par les agences (par exemple, mélange de classe 1 ou enrobé dense). Les coûts initiaux vont de 3.00 à 5.60 USD.
- Les enrobés drainants (enrobés poreux) sont les mélanges les plus utilisés aux Pays-Bas. Les coûts initiaux vont de 10.00 USD (nouvelles constructions) à 15.60 USD (remises en état) par mètre carré. La réduction du bruit est un aspect très important dans ce pays. L'utilisation de ce type de chaussée répond à un choix politique : elle permet de réduire les niveaux de bruit d'au moins 2 à 3 dB, ce qui est comparable au résultat obtenu avec la construction d'un mur antibruit, au coût élevé. Dans l'analyse des coûts, l'utilisation de ce mélange présente un rapport coût/avantage différent, notamment en milieu urbain.
- On n'a pas recueilli dans le cadre de l'analyse de données sur les coûts d'entretien de routine. On ne doit pas supposer que ceux-ci sont les mêmes pour différents types de chaussées (même s'il est vraisemblable qu'ils sont relativement similaires). Là où il manque des données dans les tableaux, c'est que les données n'ont pas été fournies dans les réponses initiales.

Pour l'analyse économique comparative, un asphalte coulé gravillonné d'une épaisseur de 30 mm a été retenu pour représenter le revêtement le plus utilisé, d'un coût de 8.00 USD par mètre carré.

Durée de vie prévue

Les couches de roulement en asphalte coulé gravillonné ont une durée de vie prévue de cinq à 15 ans. Les valeurs les moins élevées sont celles de Finlande et de Norvège, où les pneus cloutés sont utilisés tout l'hiver. Le volume de trafic a également une influence importante : sur autoroute, les voies à forte circulation (souvent pour véhicules lents) ont

une durée de vie prévue de six à huit ans, tandis que les voies à faible circulation peuvent durer jusqu'à 15 ans.

À partir des données obtenues et des valeurs estimées, une durée de vie moyenne de dix ans a été retenue pour l'évaluation économique.

Stratégies d'entretien

La durée de vie de la couche de roulement arrive à son terme lorsqu'une couche supplémentaire est nécessaire ou que la couche de surface est fraisée et remplacée. Elle est souvent allongée par des stratégies d'entretien intermédiaire, comme le scellement de fissures et/ou les emplois partiels. Les stratégies d'entretien supplémentaire ou plus solide sont moins courantes. Elles comprennent les traitements par scellement de surface, application d'une couche d'étanchéité ou mise en œuvre de béton bitumineux clouté. Une autre stratégie déterminée consiste à ne pas effectuer d'entretien jusqu'au moment du fraisage et du remplacement.

Les stratégies d'entretien dépendent des performances de la chaussée sur le terrain. Les stratégies retenues pour l'analyse économique comparative ont été basées sur des moyennes tenant compte des stratégies d'entretien obtenues à partir des modèles utilisés dans le chapitre 5.

Coûts d'entretien

Les coûts habituels des opérations de scellement de fissures vont de 1 000 à 2 600 USD par kilomètre de voie. Les coûts habituels des emplois partiels vont de 3 000 à 10 000 USD par kilomètre de voie. Les coûts du scellement de surface ou de la mise en œuvre de béton bitumineux clouté vont de 4 000 à 20 000 USD par kilomètre de voie.

Durée de fermeture à la circulation pour travaux d'entretien

Les durées habituelles de fermeture de la chaussée varient entre 0.2 et un jour par kilomètre de voie pour le scellement de fissures, entre 0.33 et un jour pour les emplois partiels et entre 0.2 et deux jours pour le scellement de surface ou la mise en œuvre de béton bitumineux clouté.

Critères de dimensionnement et de rupture des chaussées existantes

Le tableau 2.2 fournit des données sur le trafic, les méthodes de dimensionnement, la durée de vie prévue de la couche de roulement et les critères de rupture utilisés par les agences en matière d'uni, d'orniérage, de dégradation et d'adhérence. Des informations sur la politique de chaque agence y figurent également, lorsqu'elles ont été recueillies.

Les méthodes de dimensionnement habituelles mentionnées par les agences sont inspirées de la méthode Shell, de l'Asphalt Institute, de l'AASHTO, de normes provinciales et de normes nationales complétées par les catalogues et les abaques disponibles, adaptés aux conditions locales. La publication COST 333 *Development of New Bituminous Pavement Design Method* de la Direction générale de l'Énergie et des Transports de la Commission européenne (1999) constitue une synthèse complète des

méthodes de dimensionnement de chaussées utilisées dans les pays de l'Union européenne.

Les méthodes de dimensionnement tiennent compte des effets du trafic, de l'environnement, du sol de fondation et des matériaux de construction pour obtenir une conception structurale. La plupart se réfèrent à un abaque pour réaliser ou confirmer le dimensionnement.

La durée de vie de conception de la chaussée est généralement de 20 ans ou plus. Elle est différente de la durée de vie prévue de la couche de roulement, puisque le revêtement devra être renouvelé ou remplacé au cours de cette période.

Les autres informations intéressantes à noter sont les suivantes :

- L'indice de rugosité international (IRI) est largement utilisé par la plupart des agences comme mesure de performance de la chaussée et mesure de qualité de la construction, pour les projets. Les valeurs IRI pour les critères de rupture dépendent du budget de l'agence, mais les valeurs citées varient entre 2.2 et 4.4, la réponse la plus courante étant 2.4.
- De façon similaire, les valeurs d'orniérage justifiant des opérations d'entretien varient entre 13 et 25 mm, la réponse la plus courante étant 15 mm.
- Plus de 50 % des réponses indiquent que les coûts pour l'utilisateur sont pris en compte dans la conception.
- L'adhérence est un critère de rupture couramment utilisé par les agences. Les valeurs minimales signalées varient entre 0.35 et 0.4.
- Des données concernant la déformation en traction horizontale maximale pour la couche de roulement ont été fournies par deux agences. Leur valeur est de 125 ms.
- En général, les mesures du bruit ne sont pas couramment effectuées pour ces infrastructures, mais une agence interrogée, celle du Royaume-Uni, signale que la question du bruit exclut l'utilisation de revêtements en béton pour les nouvelles constructions. La réduction du bruit est un aspect très important aux Pays-Bas.

Structures de chaussées types

Le tableau 2.3 montre les structures de chaussées types utilisées dans les projets de revêtement de routes à forte circulation. Les sections spéciales telles que les carrefours giratoires et les aires de transbordement pour poids lourds n'ont pas été prises en compte. Les données portent sur l'épaisseur de la couche de roulement, l'épaisseur totale de bitume dans les structures de chaussées et l'épaisseur granulaire totale. Ces données n'ont pas été utilisées pour l'analyse économique, mais sont intéressantes pour les agences car elles servent de références et permettent de comparer les conceptions, à des fins d'évaluation, avec les chaussées avancées de haute technologie.

Les structures types signalées sont les suivantes :

- Couches de roulement d'une épaisseur généralement comprise entre 30 et 40 mm.
- Couche(s) inférieure(s) en béton bitumineux d'une épaisseur généralement comprise entre 200 et 240 mm.
- Couche(s) de base granulaires d'une épaisseur généralement comprise entre 300 mm et 1.2 m.

Tableau 2.2. Critères de dimensionnement et de rupture des chaussées existantes

Pays	Trafic			Méthode de dimensionnement	Durée de vie prévue ¹ (années)	IRI rupture	Critères d'orniérage (mm)	Dégradation fissures (%)	Prise en compte des coûts pour l'usager
	TMJA (milliers)	Équivalent charge/essieu (millions)	% poids lourds						
Canada	32	20	22	Méthodes provinciales AASHTO	15	2.2	15		Non
Danemark	60	5	8	Normes danoises	14	3.5	15		Non
États-Unis	29	13	14	Min. Transport Floride	30	2.4			Non
	10	10	15	Min. Transport Minnesota	18		13		Non
	129	12	11	AASHTO	10	2.2	14	15	Oui
Finlande	17-45		15	Abaques	5		13		Non
France	25		19	Normes nationales	8-16		15-20		Oui
Hongrie	20	18	10	Normes nationales	7	3.2	14	25	Non
Norvège	22	3	15	Norvégienne	5	4	25		Non
Pays-Bas	55	36	17	Méthode néerlandaise	9	2.5	18	20	Oui
Pologne	20	14	20	Catalogue	10	4.4	20	20	Oui
Portugal	11	19	15	Méthode Shell	15	3.5	15		Oui
Royaume-Uni	111	106	15	Rapport TRL LR1132	9	RQI	20	3	Oui
Suède	13	25	10	ATB (suédoise)	13	2.5	17	10	Oui

1. Couche de roulement uniquement.

Source : D'après les réponses au questionnaire de l'OCDE.

Des couches d'enrobés bitumineux et des couches granulaires épaisses ont été signalées. L'épaisseur totale des couches varie entre 150 et 400 mm, la réponse la plus courante étant comprise entre 200 et 270 mm. L'épaisseur des couches granulaires varie sensiblement, entre 150 mm et 2 mètres. Les couches granulaires épaisses sont utilisées dans les climats froids pour empêcher que le soulèvement dû au gel ne provoque des fissures et une détérioration de la surface de la chaussée.

Le pourcentage d'épaisseur de bitume, par rapport à l'ensemble de la structure, varie entre 9 % et 75 %, mais la réponse la plus courante est comprise entre 20 % et 40 %.

Tableau 2.3. Structures de chaussées types

Pays	Structure type	Épaisseur couche de roulement (mm)	Épaisseur totale enrobé (mm)	Épaisseur granulaire (mm)	Épaisseur totale (mm)	% enrobé dans structure totale	Équivalence structurelle ¹
	ACG = asphalte coulé gravillonné BB = béton bitumineux BBDR = béton bitumineux drainant CBC = couche de base en concassé CB = couche de base						
Canada	BB 230mm, CBC 150mm, CB 300mm, silts	50	230	450	680	34%	910
Danemark	ACG 20mm, liant BB 60mm, base BB 180mm	20	260	600	860	30%	1 120
	Enrobé 50mm, BB 200mm, CBC 450mm	50	200	450	650	31%	850
	BB 150mm, CBC 300mm, CB 300mm, silts	50	150	600	750	20%	900
Etats-Unis	Béton 320mm, CB 1 200mm		320	1 200	1 520	21%	1 840
Finlande	ACG 40mm, matériau granulaire épais	40	200	2 000	2 200	9%	2 400
France	Enrobé 25mm+40 mm+ 80mm, matériau traité au liant hydraulique 270mm+200mm	25	145	470	615	24%	760
Hongrie	ACG 40mm, BB 160mm, CBC 300mm	40	200	300	500	40%	700
Norvège	ACG 35mm, BB 185mm, CBC 700mm	35	220	700	920	24%	1 140
Pays-Bas	BBDR 50mm, BB 350mm, sable 1m	50	400	1 000	1 400	29%	1 800
Pologne	ACG 40mm, BB 90mm, CBC 140mm, CB 200mm	40	130	340	470	28%	600
Portugal	ACG 40mm, BB 230mm, matériau granulaire 350mm	40	270	350	620	44%	890
	ACG 30mm sur BB sur matériau granulaire	30	310	180	490	63%	800
Royaume-Uni	ACG 30mm sur BB sur ciment	30	390	150	540	72%	930
	ACG 30mm sur BB épais	30	450	150	600	75%	1 050
Suède	ACG 40mm, BB 200mm, matériau granulaire 1m	40	240	1 000	1 240	19%	1 480

1. L'équivalence structurelle est égale au double de l'épaisseur de l'enrobé, plus l'épaisseur granulaire (approximativement).

Source : D'après les réponses au questionnaire de l'OCDE.

Caractéristiques des matériaux de chaussées existantes

Le tableau 2.4 fournit des données sur les mélanges utilisés pour les structures de chaussée en enrobé bitumineux. Ces informations portent sur la teneur en bitume, le type de bitume, la composition granulométrique du granulat, la dimension maximale de granulat, la teneur en vides et le compactage.

La teneur en bitume varie entre 4.5 % et 6.4 %. La granularité de l'asphalte coulé gravillonné comprend 70 % à 80 % de granulats et 5 % à 8 % de fines. La dimension maximale de granulat signalée atteint 19 mm, la dimension maximale la plus couramment citée étant comprise entre 10 et 16 mm. La teneur en vides la plus couramment citée est de 4 % pour un mélange type, et de 20 % pour les enrobés drainants. Les types de bitume sont notés à l'aide de classes de pénétrabilité. Les classes les plus couramment citées vont de 50 à 100.

Les pays d'Europe méridionale utilisent pour le bitume une classe de pénétrabilité de 50 à 70 ; ceux d'Europe septentrionale utilisent une classe de pénétrabilité de 70 à 100. Cette pratique est le reflet des différents climats. Au Canada, les classes de pénétrabilité vont généralement de 80 à 100 dans les régions méridionales et de 150 à 200 dans les climats septentrionaux. Les États-Unis et certaines provinces du Canada utilisent des

classes de pénétrabilité pour le bitume conformes aux spécifications des revêtements Superpave et citent couramment des classes de 64-22. Dans les zones septentrionales, les classes de pénétrabilité sont de l'ordre de 58-28 ou 58-34.

L'utilisation de fibres a été mentionnée pour les asphaltes coulés gravillonnés, ainsi que celle de bitumes modifiés, bien qu'elle soit rare dans de nombreux pays.

Tableau 2.4. Caractéristiques des matériaux de chaussées existantes

Pays	Coût initial (USD/m ²)	Épaisseur (mm)	Teneur en bitume (%)	Compactage min (%)	Composition granulat/sable/fines	Taille max granulat (mm)	Teneur en vides (%)	Type de bitume
Canada								
Superpave	5.50	60	5.6	90.5 (Rice)	55/40/5	19	4	PG 64-28
Enrobé dense	3.00	40	4.8	90.5 (Rice)	51/49/0	16	6.8	80-100
Danemark								
TB	5.30	20	5		69/19/7	8		70-100
ACG	9.50	35	6	95	73/13/8	11	7	40-60
États-Unis								
Superpave	4.90	50	6	92 (Rice)		12.5	4	64-34
ACG	5.60	50	6.2		76/17/7	19	4	76-28
Finlande								
ACG	5.00	40	6.1		91/0/9	16	2,8	80
France								
BBTM	3.00	25	5.5		70/27.5/7.5			35/50
Hongrie								
ACG	8.00	40	6.4	97	74/14/11	12	4.3	30/60S
Norvège								
ACG	6.70	35	6.3	98	64/26/11	11	3	70-100
Pays-Bas								
BBDR	10.60	50	4.5	97	75/20/5	16	20	70-100
Pologne								
ACG	6.94	40	6.2	98	78/11/11	12.8	4	50
AP	9.20	50	5.7	98	80/15/5	12.8	3	60
Portugal								
ACG	3.44	40	5.5		80/15/5	14	4	50-70
Royaume-Uni								
Hitex	8.61	39	5		72/22/6	14	4 to 8	50
Superpave	8.15	39	4.7		70/22/8	14	4 to 8	50
Suède								
TSK	3.00	20	5.5			16		70-100
ACG	6.00	40	6.3			16		70-100

Source : D'après les réponses au questionnaire de l'OCDE.

Résumé

Pour l'analyse économique, a été retenue une épaisseur de couche de roulement de 30 mm. Les coûts initiaux retenus de ces couches de roulement de chaussée s'élèvent à 8.00 USD par mètre carré de matériau bitumineux mis en œuvre (les plus élevés parmi ceux cités pour cette épaisseur de couche de roulement).

Les asphaltes coulés gravillonnés et le mélange Superpave sont les matériaux traditionnellement ou habituellement choisis par les agences de l'OCDE pour la couche de roulement.

La durée de vie prévue de ces matériaux de surface jusqu'à leur date de remplacement est généralement de dix ans.

Les agences de l'OCDE utilisent plusieurs stratégies d'entretien :

- Pas d'entretien jusqu'au fraisage et au remplacement ou jusqu'à la fin de la durée de vie.
- Une seule opération de scellement de fissures.
- Une opération de scellement de fissures associée à une autre opération d'emplois partiels ou de scellement de fissures.
- Une opération de scellement de fissures associée à un traitement de surface/une mise en œuvre de béton bitumineux clouté, plus solide.

Les coûts habituels du scellement de fissures varient entre 1 000 et 2 600 USD et ceux des emplois partiels entre 3 000 et 10 000 USD par kilomètre de voie. Les coûts du traitement de surface/de la mise en œuvre de béton bitumineux clouté varient entre 4 000 et 20 000 USD par kilomètre de voie.

Les durées de fermeture à la circulation varient entre 0.2 et 1.0 jour pour le scellement de fissures et les emplois partiels, et entre 0.2 et 2.2 jours pour la mise en œuvre de béton bitumineux clouté.

Références

- AIPCR (2003), *Revue des pratiques dans l'utilisation des spécifications de performance en 2002*, AIPCR, Paris, France.
- Transportation Research Board (2001), *Perpetual Bituminous Pavements*, Transportation Research Circular n° 503, États-Unis.
- Transportation Research Board (2002), *Assessing and Evaluating Pavements*, Transportation Research Record n° 1806, États-Unis.
- Direction générale de l'Énergie et des Transports de la Commission européenne (1999), *Cost 333 – Development of New Bituminous Pavement Design Method – Final Report*, Bruxelles, Belgique.

Chapitre 3

Cadres d'évaluation

Ce chapitre passe en revue les méthodes d'évaluation utilisées pour planifier et réaliser les travaux de construction et d'entretien pendant la durée de vie d'une chaussée. Plusieurs modèles sont examinés et les plus adaptés ont été sélectionnés pour être utilisés dans le cadre de cette étude.

Introduction

Après plusieurs décennies de construction de routes, de nombreux pays de l'OCDE achèvent actuellement leur réseau routier principal et réduisent les dépenses consacrées aux routes nouvelles. Mais les budgets routiers nécessaires pour entretenir cette infrastructure routière sont plus élevés que jamais.

Ce rapport prend tout particulièrement en compte les possibilités offertes par les méthodes améliorées de revêtement routier et les matériaux innovants qui offriront une chaussée d'une durée de vie réellement longue, nécessitant peu ou pas d'entretien. Ces options de revêtements innovants devraient au départ être plus coûteuses que les revêtements traditionnels, mais entraîner des coûts d'entretien et de remise en état moins élevés.

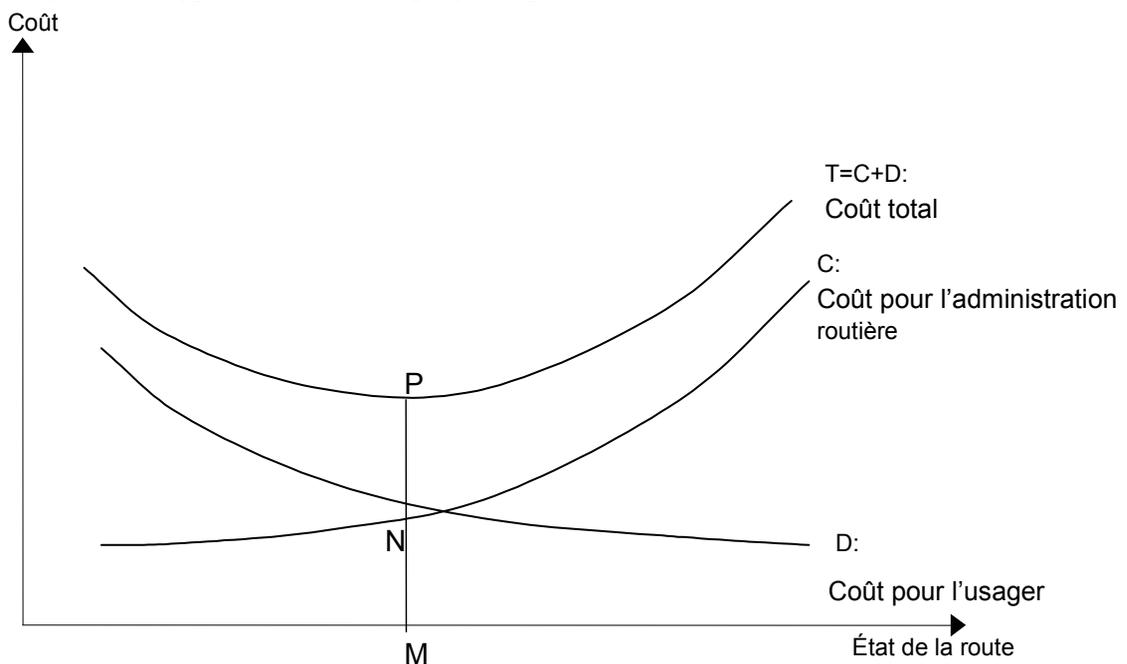
À l'heure actuelle, la gestion de l'entretien routier doit concilier le maintien d'une route dans un état approprié et le respect d'un budget limité, ces deux exigences aboutissant à des pressions contradictoires. D'une part, l'entretien courant des routes est essentiel pour maintenir à long terme la chaussée en état. Toute économie réalisée en retardant l'entretien courant à court terme se traduira en règle générale par des pertes bien plus importantes puisque les chaussées nécessiteront ultérieurement une reconstruction complète. D'autre part, les budgets d'entretien des routes font l'objet de contraintes croissantes dans tous les pays ; il est difficile, voire parfois impossible, d'entreprendre les opérations d'entretien au moment nécessaire.

Dans le passé, la plupart des administrations routières s'intéressaient principalement aux coûts directs liés à la réalisation ou au report des opérations d'entretien. Mais les décisions sur l'étendue et le calendrier de l'entretien ont des répercussions plus vastes qui doivent de plus en plus être prises en compte dans les processus décisionnels. C'est le cas de l'effet que produira la réalisation ou le report de l'entretien sur les coûts pour l'utilisateur, qui augmentent avec la dégradation des chaussées, mais qui peuvent aussi augmenter de manière significative avec les travaux d'entretien. Auparavant, lorsque les coûts pour l'utilisateur étaient pris en compte, cette pratique se limitait à des mesures d'exploitation pour améliorer la sécurité ou réduire les encombrements à proximité du chantier. Mais

plus récemment, des pressions accrues se sont exercées sur les administrations routières afin qu'elles prennent totalement en compte les coûts pour l'utilisateur dans leurs évaluations et leurs décisions sur la nature et le calendrier de l'entretien à entreprendre.

Les recherches réalisées ces 10 à 15 dernières années ont porté sur les coûts à prendre en compte. Ces derniers comprennent les coûts d'exploitation des véhicules, les coûts des accidents et les coûts pendant les travaux d'entretien et de remise en état. Le rapport de l'OCDE intitulé *Entretien et réhabilitation des routes : Financement et stratégies d'affectation* (1994) indique la part probable des différents coûts directs des administrations routières et des usagers, ainsi que leurs impacts potentiels sur les stratégies d'entretien adoptées. Ceux-ci sont illustrés sur la figure 3.1, extraite du rapport de l'OCDE.

Figure 3.1. Approche économétrique pour optimiser la remise en état et l'entretien des routes



M = État optimal des routes..

MN = Budget nécessaire au maintien des routes à l'état optimal

MP = Coût total du maintien des routes à l'état optimal.

Source : OCDE, 1994.

Ce graphique indicatif permet de voir que si les administrations routières fondent uniquement leurs décisions sur la réduction de leurs coûts directs, elles entreprendront probablement les opérations d'entretien à des périodes entraînant des coûts plus élevés pour l'utilisateur et un coût total du projet qui ne sera pas optimal.

Conscients de ces répercussions importantes et en réponse aux pressions des usagers, de nombreux gouvernements ont fixé des critères pour que les administrations routières prennent convenablement en compte les encombrements et autres coûts générés par les travaux. Pour les routes à forte circulation notamment, il est souvent exigé que les travaux soient entrepris pendant les heures creuses (nuits et week-ends), afin de réduire certains

coûts pour l'utilisateur. Évidemment, ces exigences peuvent accroître les coûts directs des projets routiers et donc les pressions budgétaires sur les administrations routières.

Ce sont autant de facteurs décisifs dans l'étude actuelle des avantages et de la viabilité des chaussées à plus longue durée de vie. Étant donné que la viabilité économique dépend du coût total réparti sur la durée de vie de la chaussée, des coûts initiaux plus élevés peuvent se justifier si les performances de la chaussée sont suffisamment améliorées. Des intervalles d'entretien plus longs et des coûts moins élevés (incluant les temps d'attente) permettent de réduire le coût total du projet. Seule une analyse du coût global sur la durée de vie de la chaussée permet d'évaluer d'un point de vue réaliste les avantages d'une chaussée à longue durée de vie. Les techniques d'estimation des coûts sur la durée de vie permettent une analyse complète des facteurs économiques pendant la durée de vie de la chaussée, l'inventaire des avantages d'une chaussée améliorée, ainsi que l'évaluation et la prise en compte du coût global du projet.

La deuxième partie de ce chapitre concerne les méthodes d'estimation des coûts sur la durée de vie permettant d'évaluer la viabilité des couches de roulement innovantes à longue durée de vie. Elle recense les pratiques internationales en matière d'estimation des coûts sur la durée de vie, sur la base des résultats des études de l'AIPCR en la matière. Ce chapitre aborde ensuite les facteurs à prendre en compte dans l'évaluation des nouvelles chaussées et enfin, il énumère et présente un certain nombre de modèles permettant d'évaluer les performances des chaussées.

Estimation des coûts sur la durée de vie – expérience dans le monde

Les différents types de chaussées présentent différents profils de coûts au long de leur vie. Les coûts initiaux de construction d'une chaussée sont souvent inférieurs aux coûts d'exploitation. L'analyse des coûts sur la durée de vie permet de définir le montant et le calendrier des coûts engagés et de choisir le type de chaussée le plus rentable. Cette analyse utilise la valeur actuelle nette (VAN) pour l'évaluation des coûts futurs afin d'établir une base de comparaison commune de ces coûts. Un taux de préférence sociale pour le présent ou taux d'actualisation (reflétant la valeur sociale liée aux dépenses et recettes actuelles par rapport aux dépenses et recettes futures) permet de réduire la valeur des coûts futurs à une année de base commune.

L'utilisation des techniques d'estimation des coûts sur la durée de vie pour envisager le coût total des projets est bien établi dans le monde de la construction. Les rapports de l'AIPCR (2000a, 2000b) examinent avec précision le coût des chaussées sur leur durée de vie totale.

L'AIPCR présente la définition suivante du coût sur la durée de vie utilisée par le ministère américain des Transports :

... procédé d'évaluation de la valeur économique totale d'un projet utilisable par l'analyse des coûts initiaux et des coûts futurs en monnaie constante, comme les coûts liés à l'entretien, l'utilisateur, la reconstruction, la remise en état et la réfection de surface sur l'ensemble de la vie d'un projet ...

Les rapports de l'AIPCR envisagent les diverses utilisations des techniques d'estimation des coûts sur la durée de vie pour une série de projets de chaussées routières. Ils prévoient les nombreux aspects et étapes d'une chaussée routière depuis le lancement du projet à la mise au rebut, en passant par la conception, la construction et l'entretien. Les coûts sont supportés par différents groupes et comprennent les coûts pour les administrations routières, les coûts pour l'utilisateur, les coûts des accidents de la circulation et les autres coûts pour la société.

En fait, les rapports de l'AIPCR mettent en évidence l'énorme diversité des méthodes utilisées par les différentes administrations routières, même dans les facteurs pris en compte pour effectuer une analyse des coûts sur la durée de vie. Les trois éléments significatifs les plus souvent inclus dans l'analyse sont les coûts de construction, les coûts des travaux futurs, ainsi que les coûts pour l'utilisateur et la société. Ce sont peut-être ces derniers qui présentent les plus grandes variations entre les administrations dont les décisions peuvent être partiellement liées à l'existence de données fiables pour l'analyse.

Les coûts sociaux sont souvent difficiles à évaluer et peuvent comprendre aussi bien les coûts environnementaux (augmentation du niveau de bruit ou de la pollution) que la hausse de la consommation d'énergie pendant les travaux d'entretien ou encore les perturbations ou les coûts pour les propriétés avoisinantes. L'analyse doit également prendre en compte les avantages apportés par les améliorations consécutives à la construction ou à l'entretien.

Tableau 3.1. Taux d'actualisation utilisés dans les pays sélectionnés

Pays	Taux d'actualisation (%)
Canada	7
Danemark	7-8 ¹
États-Unis	3-5
Finlande	5
France	8
Hongrie	10
Norvège	8
Pays-Bas	4
Pologne	8
Royaume-Uni	3.5
Suède	4

1. Le taux d'actualisation réel est de 6 %. Toutefois, d'autres facteurs sont également appliqués, portant le taux effectif à 7-8 %.

Source : D'après les réponses au questionnaire de l'OCDE.

Il existe bien d'autres aspects pouvant modifier l'analyse des coûts sur la durée de vie et variant très probablement de manière significative d'une région à l'autre. Ainsi, des variations du type de route, du type de chaussée ou de l'état des routes devraient entraîner une diversité des coûts de construction, d'exploitation et pour l'utilisateur. En outre, des différences entre les pays sont à prévoir dans les paramètres d'évaluation tels que la

période d'analyse pour évaluer le projet, le taux d'actualisation à appliquer dans l'analyse et la valeur de récupération (ou valeur résiduelle) des travaux à la fin de la période d'évaluation.

Il est particulièrement important de remarquer les variations du taux d'actualisation annuel utilisé dans les différents pays : le taux varie de 3 % à 12 % (valeurs 1998). Le tableau 3.1 présente les taux d'actualisation annuels utilisés en 2003.

Le rapport de l'AIPCR montre l'énorme diversité des durées d'évaluation choisies dans les différents pays pour les coûts sur la durée de vie des travaux routiers traditionnels. Il indique le nombre de pays utilisant différentes durées d'évaluation, comme dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2. Périodes d'évaluation pour les coûts sur la durée de vie des travaux routiers traditionnels

	Durée d'évaluation (années)				
	0-10	11-20	21-30	31-40	> 40
	Nombre de pays				
Construction nouvelle					
- Enrobé	1	14	5	3	0
- Béton	1	4	9	6	0
Entretien					
- Enrobé	5	10	1	1	0
- Béton	8	4	3	2	0
Évaluation du réseau	4	4	4	1	1

Source : AICPR, 2000a, 2000b.

Coûts pour l'utilisateur et la société

Dans les réponses au questionnaire mentionné au chapitre 2, seule la moitié des exemples prend en compte les coûts indirects ou pour l'utilisateur dans toute analyse des coûts sur la durée de vie. Ce constat est surprenant, étant donné les conclusions des rapports de l'AIPCR et le fait que les coûts pour l'utilisateur peuvent avoir un impact déterminant sur une analyse, en particulier pour les routes à forte circulation étudiées dans le présent rapport.

Plus le trafic s'intensifie, plus l'effet des encombrements sur les usagers augmente ; la valeur du temps pour les usagers augmente et l'effet des coûts du temps perdu devient plus lourd, et donc plus important dans une analyse des coûts sur la durée de vie. Bien que l'obtention de données précises puisse parfois être difficile, les coûts pour l'utilisateur et pour la société doivent être pris en compte. Dans la mesure du possible, ils doivent inclure les éléments suivants :

- Coûts du temps perdu par les usagers :

- Coûts du temps perdu pendant les travaux d'entretien, aux abords du chantier et sur l'itinéraire de déviation.
- Coûts du temps perdu dans les encombrements.
- Coûts d'exploitation des véhicules :
 - Coûts du temps perdu par les véhicules pendant les travaux d'entretien (en particulier par les véhicules utilitaires).
 - Usure accrue des véhicules (pneus notamment) à mesure que les chaussées se dégradent.
 - Consommation accrue de carburant liée à la dégradation des chaussées et aux temps d'attente.
- Coûts des accidents :
 - Coûts des accidents de la circulation plus nombreux pendant les travaux d'entretien.
 - Coûts des accidents de la circulation plus nombreux à mesure que les routes se dégradent.
 - Coûts des accidents survenant aux agents chargés de l'entretien.
- Coûts environnementaux :
 - Coûts liés au bruit (éventuellement dus aux murs antibruit).
 - Coûts liés à la pollution.
 - Coûts énergétiques.
 - Coûts des agrégats primaires peu abondants et autres aspects environnementaux similaires liés à l'utilisation des matériaux.
 - Coûts de mise en décharge des matériaux extraits.
 - Coûts du service hivernal (dont le ruissellement des eaux chargées en sels de déverglacement).
 - Coûts éventuels pour la faune et la flore.

Cadres d'évaluation

Le modèle de coût le plus adapté pour évaluer les avantages économiques d'un revêtement avancé doit pouvoir comparer les différents coûts des matériaux pris en compte et évaluer une grande diversité de types de routes. Dans l'idéal, il doit intégrer les variables suivantes et permettre leur modification par l'utilisateur : flux de circulation, croissance du trafic, composition du trafic, âge de la chaussée, climat, coûts pour l'utilisateur, valeur résiduelle de la chaussée, taux d'actualisation.

Les avantages économiques doivent refléter les avantages découlant d'une chaussée à durée de vie réellement longue. Le modèle doit calculer les réductions de coûts générées par les éléments suivants :

- Réduction de l'entretien.
- Diminution des encombrements et amélioration de la sécurité liées à la réduction de l'entretien et à un ralentissement de la dégradation de la chaussée.
- Économies de carburant et réduction des coûts d'exploitation des véhicules.
- Autres réductions de coûts (liés aux accidents, à l'environnement, etc.).

Dans l'idéal, les modèles doivent évaluer les besoins de traitements futurs en fonction de l'état constaté de la route. Les modèles moins élaborés doivent permettre à un utilisateur expérimenté de déterminer et de saisir les données concernant cet entretien futur. Dans les deux cas, ils doivent prendre en compte les éléments suivants pour évaluer l'état de la chaussée : fissuration, orniéage, adhérence, résistance structurelle et uni longitudinal.

Des tolérances doivent être prévues pour les niveaux de service minimum ; elles doivent être adaptables aux différents critères de service, à travers le monde.

D'autres points doivent être pris en considération pour évaluer l'utilité d'un modèle de coût. Ils ne sont peut-être pas tous essentiels, mais doivent être envisagés, sous une forme ou une autre, dans le cadre de l'analyse. Ce sont les suivants :

- Coûts de construction (sur et hors site).
- Aspects liés à la santé et à la sécurité des nouveaux types de chaussées (sur et hors site).
- Analyse des risques des nouvelles chaussées en service (déversement de matières dangereuses).
- Définitions communes pour toutes les variables.
- Hypothèses et variables clés à tester dans l'analyse de sensibilité.
- Horizon de temps (au moins 30 à 35 ans).

Le modèle pouvant être utilisé dans différents pays, d'autres besoins sont à prendre en compte pour l'adapter au type d'analyse faisant l'objet de ce rapport : diversité des monnaies, différences terminologiques et linguistiques, conditions requises pour l'installation du logiciel et l'assistance technique. Certains de ces besoins peuvent être satisfaits grâce à une aide en ligne ou des manuels de qualité et à une interface conviviale permettant la saisie des différentes données nécessaires.

Modèles d'évaluation disponibles

Pour ce rapport, il a fallu envisager l'existence de modèles capables d'analyser les aspects économiques des chaussées à longue durée de vie dans les scénarios à tester, et par conséquent, de comparer les performances des couches de roulement avancées décrites au chapitre 5 et des couches de roulement traditionnelles utilisées à travers le monde. Le modèle idéal devait être disponible dans le monde entier, disposer d'une assistance technique et bénéficier d'une base d'utilisateurs importante et expérimentée

pour assurer une cohérence. Enfin, il devait pouvoir s'adapter aux nombreuses variations dans les types de routes, l'état des chaussées et les climats.

Les rapports de l'AIPCR évoqués plus haut ne donnent pas de précisions concernant les modèles de coûts sur la durée de vie utilisés dans les différents pays. En règle générale, chaque pays ou administration utilisant des coûts sur la durée de vie a mis au point son propre modèle. Cela est peut-être dû au développement rapide de l'informatique : le traitement d'un grand nombre de variables est devenu une tâche ordinaire et il est plus facile de créer des modèles de coûts adaptés à chaque utilisation spécifique.

Toutefois, certains modèles disponibles et utilisés dans tous les pays ont été étudiés pour évaluer leur adéquation. Ces différents modèles de coûts sur la durée de vie sont énumérés et présentés en annexe A. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive puisque l'objet de ce rapport n'était pas de passer en revue tous les modèles. L'objectif était de trouver un modèle qui convienne à la tâche préalablement définie. Parmi les modèles examinés, deux sont présentés plus en détail ci-après.

Modèle HDM-4

Le modèle HDM-4 est un outil de développement et de gestion des routes permettant d'analyser les choix d'investissement dans le domaine routier. Il est financé par la Banque mondiale ; sa gestion et la coordination de son développement ont été confiées à l'AIPCR. Ses premières versions étaient essentiellement adaptées aux pays en développement, mais le champ d'application de sa dernière version a été élargi afin qu'il puisse répondre aux différents besoins des administrations routières, des concepteurs et des organismes de financement du monde entier. Particulièrement approprié auparavant aux climats tropicaux, il convient désormais aussi aux climats de gel. Il est actuellement enregistré dans près de 100 pays.

Le modèle HDM-4 permet d'envisager et d'évaluer de nouveaux travaux d'aménagement. Il peut analyser à la fois une section de route ou un réseau plus étendu, prévoir les futurs changements de performances et être affiné ou calibré pour une région ou un pays en particulier. Le système est compilé avec un large éventail de modèles mathématiques et logiques permettant les prédictions de performances et de coûts. Il possède un puissant outil de génération de rapports et d'analyses qui peuvent être exportés vers des bases des données ou des tableurs standard.

Le modèle ayant été initialement développé pour les climats tropicaux et récemment élargi aux climats froids, il subsiste quelques doutes sur son adéquation aux climats tempérés. Selon des essais limités, réalisés dans des pays d'Europe orientale, il est possible que HDM-4 ne soit pas représentatif des conditions propres à ces régions ou ne traite pas leurs types de chaussée et leurs conditions de circulation intense. Très puissant et composé d'un grand nombre de modules (couvrant les multiples aspects qui peuvent être inclus dans l'analyse), ce modèle semble un peu lourd et inadapté aux applications relativement simples. En dépit d'une large diffusion dans de nombreux pays, seul un nombre très limité d'utilisateurs expérimentés auraient les compétences suffisantes pour le maîtriser et disposeraient des données nécessaires sur le contexte local pour le calibrer.

Il n'en reste pas moins que le modèle HDM-4 est reconnu dans le monde entier et constitue une référence utile pour une évaluation internationale de différents types de chaussées.

Modèle SAS/PASI – Royaume-Uni

Au Royaume-Uni, la société TRL a adapté, pour la direction des routes, un modèle existant, le système d'analyse de projets SAS (Scheme Analysis System), en vue de son utilisation dans différents pays. Ce modèle permet d'analyser les options de traitement pour les projets d'entretien sur le réseau routier principal en Angleterre et de sélectionner les options rentables en termes de coûts sur la durée de vie. Basé sur une feuille de calcul Excel, ce modèle d'évaluation de projets routiers permet à l'utilisateur de comparer les options pour différentes stratégies d'entretien.

TRL a développé une variante, le modèle PASI, qui est plus adapté à un usage international et convient aussi bien aux chaussées en béton qu'aux chaussées bitumineuses. L'utilisateur peut gérer plusieurs devises, employer ses propres termes descriptifs et appliquer ses propres coûts et rendements aux options de traitement d'entretien et de gestion du trafic.

Ce modèle permet de prendre en compte les coûts pour l'usager en fonction des temps d'attente, la valeur résiduelle et les traitements réalisés sur les différentes voies de la route. L'utilisateur peut saisir toutes les données liées au contexte local ou utiliser des valeurs types tirées des données disponibles au Royaume-Uni. Basé sur un tableur, le logiciel demeure relativement simple. L'utilisateur doit entrer une stratégie d'entretien réaliste pour chaque option de chaussée prise en considération. Il peut intégrer d'autres coûts dans l'analyse, tels que le coût initial de construction, les coûts d'exploitation ou tout autre coût ou avantage associé. Ces coûts peuvent être intégrés en tant qu'éléments du coût initial d'entretien ou en tant que coûts engagés dans les années à venir de la période analysée. Tous les coûts sont actualisés sur une année de base, ce qui permet une comparaison valable des valeurs actuelles nettes (VAN) des coûts entre les options examinées.

L'objectif est d'appliquer le même modèle dans l'évaluation des options du projet ELLPAG (voir chapitre 1) relatives aux couches structurelles des chaussées à longue durée de vie.

Adéquation et utilisation des modèles sélectionnés

Les modèles HDM-4 et PASI ont été choisis en raison de leur aptitude à satisfaire (le mieux possible) aux exigences définies dans le cadre d'évaluation décrit ci-dessus. Leur disponibilité et, dans le cas du modèle PASI, sa simplicité d'utilisation avec peu d'expérience ou de formation, ont également constitué des critères importants. Les modèles ont été utilisés dans ce rapport à titre d'exemple de modèles requis par la méthode d'estimation des coûts sur la durée de vie. Bien qu'il ait été prévu de les faire fonctionner en tandem et d'analyser les exemples de la même façon, cette approche n'a pas été jugée réaliste. Le chapitre 4 présente les raisons de cette décision et les conditions d'utilisation des modèles.

Le travail a consisté à comparer deux principaux scénarios pour plusieurs flux de circulation et autres variables et à déterminer les critères permettant au revêtement avancé d'être économiquement avantageux. Pour refléter les pratiques courantes, un profil d'entretien a dû être défini pour un exemple de route avec revêtement traditionnel et méthodes d'entretien standard. Cela a été effectué en saisissant les données de l'enquête mentionnée au chapitre 2. Il a fallu ensuite comparer l'analyse du coût pour ce scénario avec le coût d'une route identique revêtue d'une couche de roulement à longue durée de vie, en tenant compte du profil d'entretien amélioré grâce aux matériaux de chaussées avancées. Dans les deux cas, la chaussée existante a été supposée présenter une dégradation de surface (orniérage, fissuration, irrégularité ou perte de rugosité) et nécessiter une nouvelle couche de roulement.

Nous verrons que dans l'analyse, les traitements d'entretien concernent uniquement les couches de revêtement, ce qui suppose que les couches structurelles sont ignorées. Dans tous les cas, on part de l'hypothèse selon laquelle la couche d'assise existante présente une résistance suffisante et est en assez bon état pour être décrite comme une route « à longue durée de vie » ne nécessitant pas de reconstruction pendant la période d'analyse. Dans le cas du modèle PASI, le profil d'entretien est défini par l'utilisateur et n'est pas lié à des critères de dégradation ; l'état des couches structurelles peut donc être ignoré. Les résultats complets de cette analyse sont présentés au chapitre 4.

Références

OCDE (1994), *Entretien et réhabilitation des routes: Financement et stratégies d'affectation*, OCDE, Paris.

AIPCR (2000a), *Coût des routes sur toute leur durée de service – Chaussées souples*, AIPCR, Paris.

AIPCR (2000b), *Coût des routes sur toute leur durée de service – Chaussées en béton*, AIPCR, Paris.

Chapitre 4

Viabilité économique des revêtements de chaussées à longue durée de vie

Ce chapitre décrit une analyse de la viabilité économique des revêtements de chaussées avancés. L'analyse montre que sous certaines conditions, les coûts initiaux plus élevés des couches de roulement avancées sont compensés par une durée de vie plus longue du revêtement, associée à une réduction des coûts d'entretien sur toute la période.

À partir des données du chapitre 2, une évaluation des coûts sur la durée de vie des couches de roulement traditionnelles est effectuée en fonction des stratégies habituelles d'entretien des chaussées et en tenant compte des coûts associés pour l'utilisateur.

Les mêmes étapes sont suivies pour l'évaluation des couches de roulement à longue durée de vie. Dans ce cas, les coûts sur la durée de vie prennent en compte l'augmentation des coûts initiaux des couches de roulement, mais aussi la réduction des coûts associés à une diminution de l'entretien et des temps d'attente sur la période d'évaluation.

Dans les deux cas, les coûts sur la durée de vie sont ensuite actualisés pour obtenir la valeur actuelle nette (VAN) des coûts des options liées à la couche de roulement innovante, par comparaison avec les méthodes traditionnelles.

Modèles utilisés

Les modèles de coûts sur la durée de vie sélectionnés pour cette analyse ont été décrits au chapitre précédent. L'analyse s'est appuyée essentiellement sur la version internationale (PASI) du système d'analyse de projets SAS. Le modèle HDM-4 a surtout été utilisé pour la prise en compte des coûts d'exploitation des véhicules. Des précisions sur l'utilisation des modèles figurent en annexe A.

Données disponibles

Une modélisation précise et fiable des coûts sur la durée de vie dépend de l'accès à des données d'entrée précises. Pour obtenir des résultats cohérents, il convient d'utiliser les meilleures données disponibles pour les calculs initiaux et les prédictions des besoins d'entretien.

Au chapitre 2, ont été examinées les données récentes de plusieurs pays concernant les coûts des couches de roulement et les traitements d'entretien standard, leurs performances et les intervalles entre traitements.

Pour les nombreuses variables dont les données n'avaient pas été obtenues grâce à l'enquête mentionnée au chapitre 2, l'expérience acquise sur les interventions courantes a permis de déterminer la méthode et les valeurs à utiliser dans l'analyse. La valeur spécifique ou la série de valeurs adoptées sont décrites plus loin dans ce chapitre.

Les travaux d'entretien augmentent les coûts pour l'usager en raison des perturbations de la circulation et des temps d'attente. Ces coûts représentent donc une part essentielle de l'analyse des coûts sur la durée de vie, relative aux travaux d'entretien. Pour les calculs effectués avec le modèle PASI, les temps d'attente pendant les travaux d'entretien, liés à l'option de gestion du trafic retenue, sont convertis en coûts et intégrés dans l'évaluation du total des coûts.

Base de l'analyse

Exemple de projet

L'analyse part d'un exemple de route préfabriquée, réalisée avec une chaussée à longue durée, en bon état structurel, mais dont la couche de surface doit être remplacée. Le projet porte sur une autoroute à deux fois 3 voies, d'une longueur de 4 km et, de manière générale, sans inclinaison, carrefour ou virage importants. L'analyse a été conçue pour comparer le total des coûts de deux traitements initiaux différents, sur une période d'évaluation de 45 ans : traitement de surface traditionnel ou revêtement avancé à longue durée de vie.

Traitement traditionnel

Les données d'entrée utilisées pour l'analyse sont basées sur les réponses au questionnaire mentionné au chapitre 2. Bien que les coûts et les traitements varient considérablement d'un pays à l'autre, les valeurs utilisées correspondent à une stratégie de traitement qui pourrait être considérée comme représentative des pratiques actuelles dans de nombreux pays.

Revêtement :	30 mm (type asphalte coulé gravillonné ou similaire)
Remplacement du revêtement :	30 mm tous les 8 ans en cas de trafic très lourd, tous les 10 ans en cas de trafic lourd, 100 mm tous les 16 ans en cas de trafic très lourd, tous les 20 ans en cas de trafic lourd
Coût :	USD 8 /m ² pour la réfection de 30 mm de revêtement (enlèvement et remplacement)

Il a été supposé que pour la réfection du revêtement, la couche de surface existante serait fraisée avant son remplacement par une nouvelle couche de roulement. Les réponses au questionnaire indiquent que de nombreux pays utilisent un procédé de scellement de fissures entre les principaux travaux de réfection, permettant d'allonger les

intervalles entre deux grandes interventions. Ces travaux ont également été envisagés dans le cadre d'une autre stratégie d'entretien, pour l'analyse de projets routiers à faible circulation.

Couche de roulement avancée

L'objectif de l'option de couche de roulement avancée a été d'évaluer les critères de coût et de performance qui rendraient les revêtements avancés (à longue durée de vie) économiquement viables tout en tenant compte des travaux routiers et des coûts pour l'utilisateur. En l'absence d'expérience sur les revêtements innovants, il a fallu apprécier leurs performances probables. L'analyse entreprise reflète donc des scénarios de type « Que se passerait-il si ? », basés sur les perspectives actuelles.

Les stratégies d'entretien utilisées se fondent sur les hypothèses suivantes :

Coût du revêtement avancé :	Trois à cinq fois supérieur au coût d'un traitement traditionnel
Durée de vie du revêtement avancé avant remplacement :	30 ou 40 ans
Traitement de surface :	Traitements intermédiaires pour améliorer l'adhérence

Ces hausses des coûts de la couche de roulement doivent être envisagées dans le contexte des coûts habituels de construction des chaussées. Pour l'exemple de projet choisi d'une autoroute à deux fois trois voies, les coûts de construction de la chaussée s'élèveraient de 1.8 million d'USD à 2.25 millions d'USD par kilomètre de chaussée. Cette estimation comprend des postes tels que les terrassements, le drainage, le marquage, les barrières de sécurité, etc. Elle ne comprend pas les autres structures telles que les ponts ou les tunnels, les portiques, etc.

À l'heure actuelle, la couche de surface (couche de roulement) de ces chaussées représente entre 9 % et 12 % des coûts indicatifs de construction de chaussées, mentionnés plus haut. Un triplement du coût de la couche de roulement entraînerait une augmentation du coût global de construction de la structure de la chaussée pouvant atteindre 24 % ; la couche de surface représenterait alors environ 30 % des coûts de construction.

Bien entendu, le coût total de construction des routes à forte circulation varie considérablement en fonction non seulement des coûts de construction de la chaussée, mais aussi du nombre de ponts, de tunnels et de terrassements nécessaires. Le coût global moyen par kilomètre de chaussée s'élève de 3.15 millions d'USD à 3.6 millions d'USD, si l'on prend en compte ces autres coûts. Un triplement du coût de la couche de surface de la chaussée a alors un impact inférieur sur le coût global de construction de l'autoroute par kilomètre (entre 10 % et 15 %) et la couche de surface ne représente qu'entre 5 % et 20 % du coût total de construction. Dans le cas d'un projet de route totalement nouvelle,

ce pourcentage est même inférieur si le coût total comprend les ouvrages d'art, les acquisitions foncières, les coûts de conception et les communications.

Scénarios d'entretien

Revêtement avancé d'une durée de vie de 40 ans

Les profils d'entretien utilisés dans l'analyse pour différents volumes de trafic (TMJA compris entre 40 000 et 100 000 véhicules) sont indiqués dans le tableau 4.1. Ils sont fondés sur l'expérience acquise avec les revêtements traditionnels et sur les hypothèses relatives à l'entretien nécessaire aux revêtements avancés sur une durée de vie de 40 ans.

Le revêtement avancé a reçu un traitement intermédiaire appelé « régénération ». La nature exacte de ce dernier n'a pas été spécifiée, mais il est indiqué qu'il a été possible de retrouver et de maintenir un niveau d'adhérence acceptable sur toute la période d'évaluation.

Tableau 4.1. Comparaison des scénarios d'entretien sur 40 ans

Trafic : TMJA ¹ de 40 000 et 60 000				Trafic : TMJA ¹ de 80 000 et 100 000			
Traditionnel		Avancé		Traditionnel		Avancé	
Année 0	Chaussée 30mm	Année 0	Revêtement avancé	Année 0	Chaussée 30mm	Année 0	Revêtement avancé
Année 10	Chaussée 30mm	Année 20	Régénération	Année 8	Chaussée 30mm	Année 15	Régénération
Année 20	Chaussée 100mm	Année 40	Revêtement avancé	Année 16	Chaussée 100mm	Année 30	Régénération
Année 30	Chaussée 30mm			Année 24	Chaussée 30mm	Année 40	Revêtement avancé
Année 40	Chaussée 100mm			Année 32	Chaussée 30mm		
				Année 40	Chaussée 100mm		

1. TMJA – Trafic moyen journalier annuel dans les deux sens de circulation.

Revêtement avancé d'une durée de vie de 30 ans

Les ajustements apportés au scénario d'entretien lorsque le revêtement avancé a une durée de vie inférieure à 30 ans sont indiqués dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2. Comparaison des scénarios d'entretien pour les revêtements avancés d'une durée de vie de 30 ans

Trafic : TMJA de 40 000 et 60 000		Trafic : TMJA de 80 000 et 100 000	
Année 0	Revêtement avancé	Année 0	Revêtement avancé
Année 15	Régénération	Année 10	Régénération
Année 30	Revêtement avancé	Année 20	Régénération
Année 44	Régénération	Année 30	Revêtement avancé
		Année 40	Régénération

Traitement d'entretien par scellement de fissures

Le profil d'entretien avec l'option de traitement par scellement de fissures (au lieu du remplacement par un revêtement traditionnel) est indiqué dans le tableau 4.3. Cette option n'a été envisagée que pour les routes à faible circulation.

Tableau 4.3. Scénario d'entretien du revêtement traditionnel avec option de scellement de fissures

Trafic : TMJA de 40 000 et 60 000 uniquement	
<i>Traditionnel</i>	
Année 0	Revêtement 30 mm
Année 5	Scellement de fissures
Année 10	Scellement de fissures
Année 15	Revêtement 30 mm
Année 20	Scellement de fissures
Année 25	Scellement de fissures
Année 30	Revêtement 100 mm
Année 35	Scellement de fissures
Année 40	Scellement de fissures
Année 45	Revêtement 30 mm

Cas test standard

Le cas test « standard », mis au point pour les essais, les analyses et les comparaisons de la VAN des coûts, contient la série de paramètres et de conditions suivante :

Coût du revêtement avancé :	Trois fois supérieur au coût du revêtement traditionnel
Durée de vie du revêtement avancé :	40 ans
Volume de trafic (TMJA) :	80 000
Pourcentage de poids lourds :	15 %
Taux d'actualisation :	6 % par an
Modèle de travaux :	Travaux de nuit

Ce cas test « standard » a servi également de base pour étudier l'impact de la VAN des coûts de variables telles que le taux de croissance du trafic et les modalités de travaux (par exemple, travaux d'entretien réalisés de nuit ou de jour).

Variables, hypothèses et analyses de sensibilité

Bien sûr, les volumes réels de trafic varient d'un projet à l'autre et les taux d'actualisation diffèrent selon les pays de l'OCDE. Chaque pays fait face à des conditions économiques particulières et on peut constater des différences dans des domaines tels que les stratégies de gestion du trafic. L'analyse a donc pris en compte différents scénarios et une série de valeurs permettant de couvrir toutes les conditions normalement rencontrées dans les différents pays.

Les variables comprises dans les analyses de sensibilité et les séries testées sont :

Coût du revêtement avancé :	Trois et cinq fois supérieur au coût du revêtement traditionnel
Durée de vie du revêtement :	30 et 40 ans
Volume de trafic (TMJA) :	40 000, 60 000, 80 000, 100 000
Pourcentage de poids lourds :	5 %, 10 %, 15 %, 20 %
Taux d'actualisation :	3 %, 6 %, 8 %, 10 %

En raison de la nature des chaussées (multiplicité des variables pouvant influencer sur les performances et des pratiques d'entretien adoptées dans les différents pays), il n'a pas été possible de réunir des données sur tous les aspects de l'analyse permettant leur utilisation appropriée dans le modèle. Les remarques suivantes mettent en évidence les points sur lesquels des hypothèses ont dû être émises pour l'analyse PASI, et précisent les valeurs ou les conditions d'utilisation. Un résumé des résultats de ces analyses est apporté plus loin dans ce chapitre. Le rapport complet figure en annexe D.

Coûts pour l'utilisateur : les coûts pour l'utilisateur dus au temps d'attente et aux perturbations de la circulation dans les zones concernées par les travaux d'entretien ont été calculés à l'aide de tables de conversion incluses dans le modèle PASI. Ces tables ont été élaborées à partir du modèle QUADRO (Queues and delays at roadworks sites – files et temps d'attente sur routes en travaux) du ministère britannique des Transports. Ce modèle utilise les valeurs du temps du Royaume-Uni pour l'évaluation. L'examen des valeurs du temps de différents pays semble indiquer que pour certains groupes de véhicules, les valeurs du Royaume-Uni pourraient se situer dans la frange inférieure des pays considérés. Des valeurs du temps plus élevées auraient une influence significative sur les estimations des coûts pour l'utilisateur et par conséquent, sur le résultat des évaluations. Des travaux ultérieurs pourraient porter sur l'ajustement des valeurs utilisées, afin de les rendre plus représentatives.

Modalités et coûts de gestion du trafic : des options de gestion du trafic différentes influent sur les temps d'attente des automobilistes et par conséquent, sur les coûts du temps perdu. Les modalités de gestion du trafic pendant les travaux d'entretien qui étaient les plus adaptées au traitement de surface et au volume de trafic particuliers ont été retenues parmi toutes les options actuellement utilisées sur le réseau routier principal au Royaume-Uni. Les modalités d'exploitation de base ne semblant pas varier sensiblement d'un pays à l'autre lors du calcul des coûts pour l'utilisateur, il a paru approprié d'utiliser une

seule source pour toutes les données nécessaires. Cela a permis d'obtenir une base cohérente de comparaison des coûts pour l'utilisateur, liés aux différentes options de traitement.

Rendements : le rendement des travaux permet de calculer le temps nécessaire à chaque traitement de surface et par conséquent, le temps d'attente probable. Pour le revêtement traditionnel, le rendement de chaque traitement sélectionné a été déterminé à partir des réponses au questionnaire mentionné au chapitre 2. Le revêtement avancé à longue durée de vie n'ayant pas encore été mis en œuvre lors d'essais en vraie grandeur, aucune valeur réelle de rendement n'est donc disponible. Les valeurs utilisées ont été basées sur l'évaluation d'un rendement approprié pour travailler avec ce type de matériau (voir annexe B).

Horaires des travaux : la longueur quotidienne des travaux détermine la période totale nécessaire pour effectuer chaque traitement de surface, laquelle influe à son tour sur les coûts pour l'utilisateur. Sauf mention contraire, l'analyse est partie de l'hypothèse selon laquelle tous les traitements de surface étaient réalisés la nuit. Telle est la méthode la plus couramment utilisée pour les travaux d'entretien sur les routes à forte circulation. L'analyse s'est fondée sur une longueur de huit heures pour des travaux de nuit ou sur une longueur de 10 heures pour des travaux de jour. Dans le cas des travaux de nuit, le modèle PASI prend en compte la longueur moins importante, mais aussi le volume de trafic plus faible, entraînant une réduction des coûts du temps perdu par rapport aux travaux de jour. Une comparaison des VAN dans le cas test « standard » pour des travaux de nuit et des travaux de jour figure plus loin dans ce chapitre. Des travaux ultérieurs pourraient évaluer la sensibilité de la VAN à des modifications de ces valeurs.

Croissance du trafic : il est difficile de faire une évaluation précise de la croissance du trafic, si une seule valeur est utilisée pour couvrir toute la période d'évaluation. La croissance future du trafic sera influencée par un certain nombre de facteurs (situation des économies nationales et mondiale, politiques nationales) et sera donc différente selon les pays. En outre, les taux de croissance varieront probablement selon les types de véhicules, allant des voitures particulières aux poids lourds.

Une croissance moyenne du trafic de 1 % par an a été utilisée dans toutes les séries d'analyses de cas test standard. Il est possible que ce taux de croissance soit faible pour certains pays. Cependant, des problèmes de capacité pourraient survenir si l'on utilise une valeur plus élevée pour l'étude des routes à forte circulation, en début d'analyse. Ainsi, une route d'un trafic moyen journalier annuel au départ de 100 000 véhicules augmentant de 2 % par an devra afficher une capacité de 220 000 véhicules au bout de 40 ans.

Pour pouvoir étudier l'effet des autres taux de croissance, une série d'analyses sur le cas test standard a également été effectuée en utilisant la variation des taux de croissance suivante, sur la période d'évaluation :

10 premières années :	2 % par an
10 années suivantes :	1.5 % par an
Années restantes :	1 % par an

Valeur résiduelle : il est important de prévoir une tolérance pour la valeur résiduelle du revêtement au terme de la période d'analyse, afin de prendre en compte la valeur ajoutée par un traitement dans les dernières années de la période d'évaluation. Le modèle PASI détermine la valeur résiduelle proportionnellement au coût de ce traitement final, en fonction du nombre d'années restantes sur la durée de vie du revêtement, à la fin de la période d'évaluation.

Résultats pour le cas test « standard »

À partir des hypothèses décrites plus haut, l'analyse économique a montré les bonnes perspectives de viabilité économique des chaussées innovantes à longue durée de vie.

Les résultats de l'analyse du cas test « standard » sont indiqués dans le tableau 4.4. Ils montrent la part de chaque élément différent dans la VAN des coûts. Pour un revêtement traditionnel et un volume de trafic relativement élevé (TMJA de 80 000), on peut voir que les coûts initiaux, les coûts d'entretien futurs et les coûts pour l'utilisateur représentent une part importante de la VAN des coûts. La VAN du total des coûts des travaux n'est guère différente pour les options de couches de roulement traditionnelle et à longue durée. Pour le revêtement avancé, c'est évidemment la réduction des coûts pour l'utilisateur qui compense en majeure partie le coût initial élevé, donnant une VAN de coûts inférieure et par conséquent, un avantage économique.

Les valeurs des coûts d'exploitation des véhicules (CEV), obtenues à l'aide du modèle HDM-4 de la Banque mondiale, sont également indiquées dans le tableau 4.4. Ce modèle peut analyser une grande diversité d'états des chaussées. L'analyse HDM-4 a donné des valeurs élevées pour le total des CEV liés aux stratégies individuelles. Toutefois, il s'est avéré que pour les variations légères de l'état d'une route évoquées dans cette analyse, le modèle n'a montré que de faibles différences dans les coûts d'exploitation des véhicules et a mis peu de tendances en évidence.

Tableau 4.4. Résultats du cas test standard

Coûts du traitement de surface <i>Facteurs</i>	Valeur actuelle nette (milliers de USD)	
	<i>Traditionnel</i>	<i>Avancé</i>
Coûts initiaux des travaux (traitement à l'année 0)	480.48	1 441.44
Travaux d'entretien	1 084.21	282.21
Coûts pour l'usager (temps d'attente)	1 278.65	515.90
Coûts de gestion du trafic	259.04	168.69
Valeur résiduelle	-43.63	-91.63
Valeur actuelle nette totale (VAN)	3 058.75	2 316.61
Différence		742.14
Différence en pourcentage		24.3%
Coûts pour l'usager (CEV) selon modèle HDM-4	1 354.31	1 353.81
Différence dans les coûts pour l'usager		-0.50
VAN ajustée comprenant la différence dans les CEV	3 058.75	2 316.11

Étant donnée la valeur relativement élevée des coûts d'exploitation des véhicules, il convient soit de prendre en compte une proportion de ces coûts dans le calcul, soit d'utiliser l'écart entre les valeurs. Pour ce tableau, c'est cette dernière solution qui a été retenue. On peut voir que l'inclusion de l'écart entre les CEV, estimé à l'aide du modèle HDM-4, n'a pas d'impact significatif sur la différence dans la VAN des deux options.

Les résultats de l'analyse, montrant la part représentée par chaque facteur dans la VAN des coûts, sont indiqués ci-dessous.

Résultats pour le cas standard avec variations des hypothèses

Les effets des variations de certains paramètres de base utilisés dans le cas « standard » ont également été examinés.

Travaux de jour

Le tableau 4.5 montre les résultats d'une analyse avec le même TMJA, mais avec des travaux d'entretien réalisés de jour et non de nuit. Le volume de trafic est supérieur en journée, ce qui entraîne des temps d'attente plus importants et des coûts pour l'usager sensiblement plus élevés. En conséquence, le coût global est plus élevé aussi bien pour les chaussées traditionnelles que pour les chaussées à longue durée de vie. En outre, les réductions de coûts en cas d'utilisation des revêtements avancés sont plus importantes dans les scénarios de travaux de jour. Cela signifie que les résultats présentés pour le cas test standard, basés sur des travaux d'entretien réalisés exclusivement de nuit, constituent une évaluation prudente des avantages éventuels en termes de VAN.

Tableau 4.5. Cas « standard » avec travaux d'entretien de jour

Coûts du traitement de surface <i>Facteurs</i>	Valeur actuelle nette (en milliers de USD)	
	<i>Traditionnel</i>	<i>Avancé</i>
Coûts initiaux des travaux	480.48	1 441.44
Coûts d'entretien	1 084.21	282.21
Coûts pour l'utilisateur (temps d'attente)	4 215.70	1 719.68
Coûts de gestion du trafic	253.50	165.90
Valeur résiduelle	-43.63	-91.63
VAN totale	5 990.26	3 517.60
Différence		2 472.66
Différence en pourcentage		41.3%

Note : TMJA 80 000, poids lourds 15 %, coût 3 fois supérieur, durée de vie 40 ans, croissance du trafic 1 %.

Taux de croissance différentiel du trafic

Les autres variations du cas « standard » ont pris en compte la croissance différentielle du trafic. Au lieu du taux de croissance stable de 1 % utilisé dans les résultats du test standard, l'analyse a envisagé le taux de croissance variable décrit plus haut (taux de croissance annuel de 2 % pendant les dix premières années, puis 1.5 % pendant les dix années suivantes et enfin 1 % pendant les dix dernières années (soit à partir de l'année 20). Les résultats sont indiqués dans le tableau 4.6.

À un taux de croissance plus élevé, l'option de revêtement avancé devient plus intéressante que les méthodes de revêtement traditionnelles. Bien que les variations par rapport au cas standard ne soient pas aussi importantes que celles liées au changement entre travaux de nuit et de jour, l'analyse suggère cette fois encore que les résultats pour le cas test standard correspondent à une approche prudente.

Tableau 4.6. Paramètres du cas « standard » avec taux de croissance différentiel du trafic

Coût du traitement de surface <i>Facteurs</i>	Valeur actuelle nette (en milliers de USD)	
	<i>Traditionnel</i>	<i>Avancé</i>
Coûts initiaux des travaux	480.48	1 441.44
Coûts d'entretien	1 084.21	282.21
Coûts pour l'utilisateur (temps d'attente)	1 997.11	766.31
Coûts de gestion du trafic	258.04	168.69
Valeur résiduelle	-43.63	-91.63
VAN totale	3 777.21	2 567.02
Différence		1 210.19
Différence en pourcentage		32%

Note : TMJA 80 000, poids lourds 15 %, coût 3 fois supérieur, durée de vie 40 ans, travaux de nuit.

Entretien par scellement de fissures

L'analyse décrite plus haut portait sur les stratégies d'entretien prévoyant le remplacement du revêtement traditionnel. Une autre méthode consiste à effectuer un scellement de fissures de surface, en traitement intermédiaire. Cette option n'est jugée appropriée qu'aux faibles niveaux de trafic, pour lesquels elle a été modélisée. Les résultats, pour les quelques cas examinés, sont indiqués en annexe D. Les coûts de traitement pour les options de scellement de fissures sont 13 % à 22 % inférieurs aux coûts du revêtement traditionnel auparavant étudiés. Toutefois, on peut voir que seules quelques-unes des situations modélisées montrent un avantage en faveur du revêtement avancé. Ce résultat est essentiellement lié aux faibles volumes de trafic auxquels l'option de scellement de fissures peut être adoptée.

Résultats des analyses de sensibilité

L'analyse a étudié l'impact des variations de certains paramètres et hypothèses déterminants. Les résultats sont indiqués sur les figures 4.1 à 4.4 et montrent le pourcentage de réduction de la VAN des coûts pour le revêtement avancé à longue durée de vie, par rapport au revêtement traditionnel (une valeur positive indique une réduction en cas d'utilisation du revêtement à longue durée de vie).

La figure 4.1 part de l'hypothèse selon laquelle les coûts du revêtement avancé sont trois fois supérieurs à ceux du revêtement traditionnel et montre que les résultats sont très sensibles au taux d'actualisation retenu. Lorsque celui-ci est élevé, les couches de roulement à longue durée de vie ne seraient rentables que sur les routes à forte circulation (TMJA supérieur à 80 000 véhicules environ).

Figure 4.1. Pourcentage de réduction de la VAN : coût 3 fois supérieur, poids lourds 15 %, durée de vie 40 ans

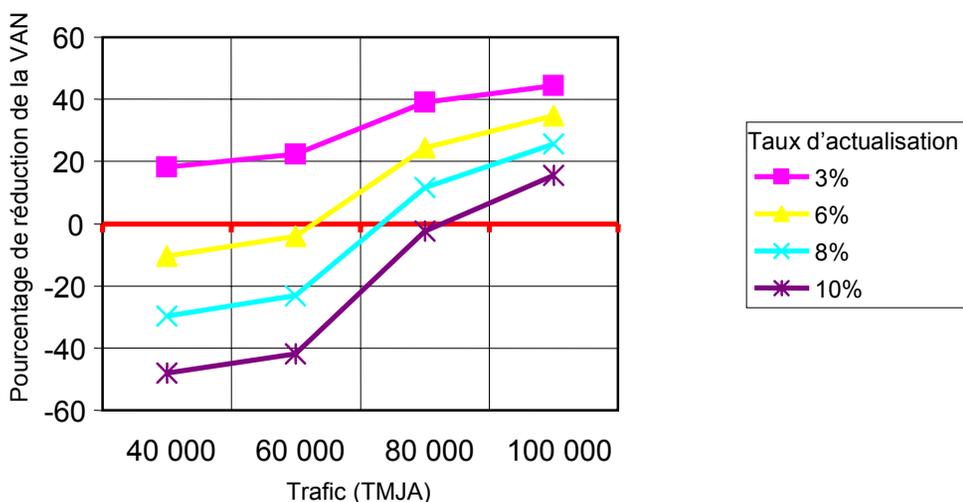
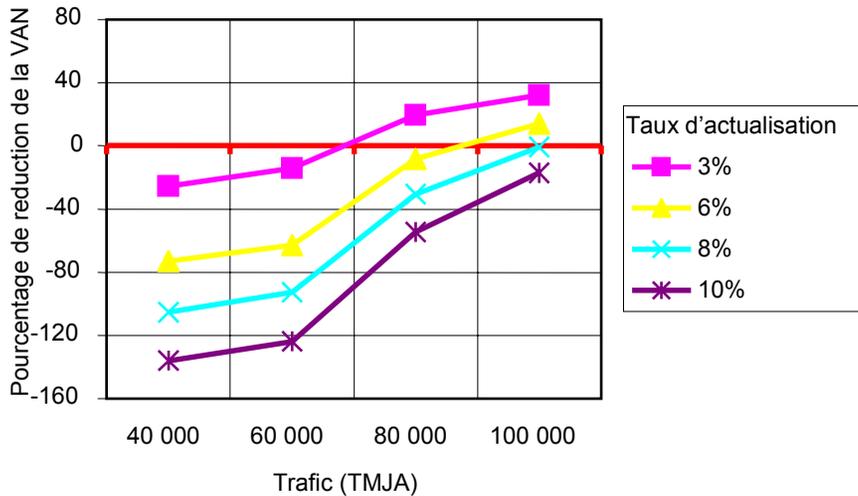


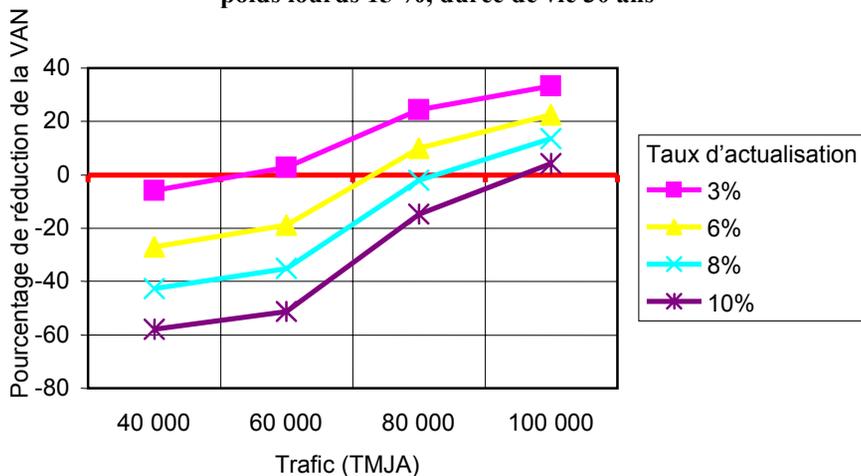
Figure 4.2. Pourcentage de réduction de la VAN : coût 5 fois supérieur, poids lourds 15 %, durée de vie 40 ans



Si le coût initial de la couche de roulement à longue durée de vie est cinq fois supérieur au coût des chaussées traditionnelles, elle ne serait rentable que sur les routes à forte circulation, dans les pays où le taux d'actualisation est très faible (figure 4.2).

La figure 4.3 montre l'impact obtenu si la durée de vie effective de la couche de roulement est de 30 ans au lieu de 40 ans. L'avantage économique d'une couche de roulement d'un coût trois fois supérieur à celui des revêtements traditionnels est moins intéressant si les chaussées ont une durée de vie de 30 ans (figure 4.3) au lieu de 40 ans (figure 4.1).

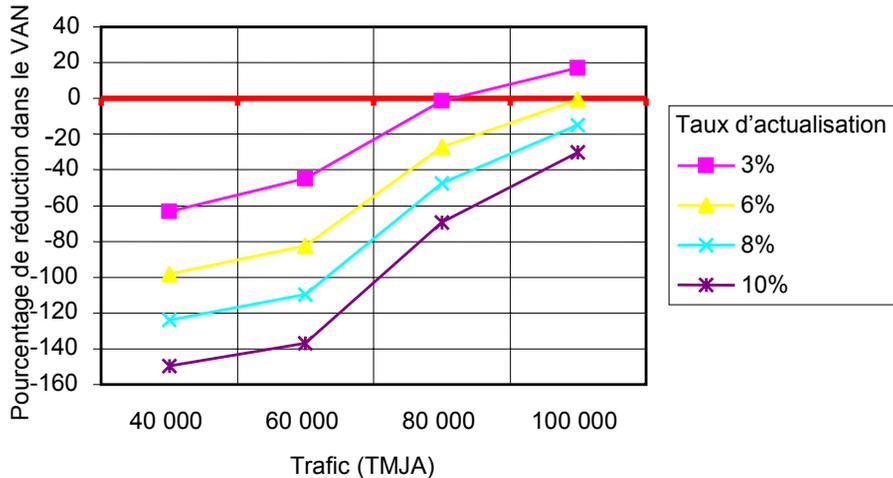
Figure 4.3. Pourcentage de réduction de la VAN : coût 3 fois supérieur, poids lourds 15 %, durée de vie 30 ans



La figure 4.4 montre l'impact sur la viabilité pour un coût initial élevé (cinq fois supérieur) et une durée de vie de 30 ans. Les résultats indiquent que les chaussées à longue durée de vie ne seraient pas rentables si leurs coûts initiaux étaient cinq fois

supérieurs à ceux d'un revêtement traditionnel et qu'elles avaient une durée de vie limitée à 30 ans.

Figure 4.4. Pourcentage de réduction de la VAN : coût 5 fois supérieur, poids lourds 15 %, durée de vie 30 ans



Les résultats complets des analyses réalisées avec le modèle PASI figurent en annexe D. Les cases des tableaux sont en grisé lorsque des différences dans les chiffres de la VAN montre un avantage économique en faveur du revêtement avancé. On peut voir sans surprise que cela se produit pour des volumes de trafic élevés et de faibles taux d'actualisation.

Discussion des résultats

Il faut garder à l'esprit un certain nombre de points lors de l'examen des résultats présentés plus haut :

- Il est important de rappeler que les couches de roulement à longue durée de vie pour lesquelles ces évaluations indicatives ont été entreprises ne sont pas encore en service, de manière générale. Il a donc fallu émettre des hypothèses sur le coût, la durée de vie, l'état et les modalités d'entretien à inclure dans l'analyse du revêtement avancé. Toutefois, l'analyse indique les fourchettes larges dans lesquelles les coûts des nouvelles couches de roulement doivent se situer pour être rentables. Des travaux ultérieurs sur la mise au point de ces matériaux, ainsi que leurs coûts et leurs performances réels sont nécessaires. Lorsque leurs résultats seront disponibles, ils fourniront des données pour une évaluation précise des coûts sur la durée de vie.
- Pour les conditions d'analyse supposées dans cette étude, on constate un avantage en termes de coûts sur la durée de vie lié à l'utilisation du revêtement avancé uniquement lorsque le volume de trafic est relativement élevé et que les taux d'actualisation sont modérés ou faibles. Le principal facteur d'amélioration des avantages est la réduction des coûts pour l'utilisateur. Dans les projets routiers

actuels, des pressions accrues sont exercées pour réduire les perturbations de la circulation dues aux travaux d'entretien sur les routes à forte circulation. Les résultats du modèle reflètent ces pressions. L'utilisation du revêtement avancé sur des chaussées à longue durée de vie peut permettre de répondre aux besoins de réduction des perturbations occasionnées aux usagers.

- Pour le plus faible volume de trafic considéré (TMJA de 40 000), la VAN liée au revêtement avancé n'est réduite qu'avec un taux d'actualisation de 3 % (figure 4.1). Le graphique semble suggérer également qu'avec un taux d'actualisation de 3 % et les conditions supposées dans cette étude, des réductions pourraient être obtenues grâce à la couche de roulement à longue durée de vie, pour un TMJA inférieur à 40 000. Or, l'expérience laisse à penser que cela est improbable. Des travaux ultérieurs seraient nécessaires avant de pouvoir tirer une telle conclusion.
- Le même profil d'entretien a été utilisé pour les différents pourcentages de poids lourds alors que, d'un point de vue réaliste, le revêtement rendrait un meilleur service pour des pourcentages de poids lourds moins élevés.
- On a supposé que les modalités de gestion du trafic pour tous les traitements d'entretien seraient similaires (avec de légères différences entre les volumes de trafic faibles et élevés). Cette fois encore, des travaux ultérieurs dans ce domaine permettraient d'étudier les options de trafic les mieux appropriées, d'un point de vue réaliste, au volume de trafic réel pris en considération.

Variations entre modèles

Bien que le modèle HDM-4 ait été utilisé et que l'analyse ait été entreprise pour reproduire les résultats du modèle PASI, les résultats obtenus avec le modèle HDM-4 montrent des différences très faibles entre les options d'entretien. Cela s'explique par plusieurs raisons, présentées ci-dessous.

Comme cela est indiqué plus haut, pour reproduire dans HDM-4 la stratégie d'entretien requise, à des fins de modélisation, il a fallu considérer que la route était dans un état relativement bon (en termes de HDM-4), avec des valeurs IRI faibles. Cette hypothèse a contribué aux faibles différences existantes dans les VAN des coûts obtenues. Des travaux supplémentaires à l'aide du modèle HDM-4 ont montré que les réductions des coûts pour l'utilisateur (coûts d'exploitation des véhicules et coûts liés aux temps de parcours) entre le profil d'entretien du revêtement traditionnel et le profil d'entretien du revêtement avancé étaient multipliées par 33 lorsque l'entretien du revêtement traditionnel était basé sur l'état courant des routes en Pologne et dans certains pays d'Europe orientale. Ces chiffres étaient basés sur un entretien approprié pour une route d'une valeur IRI de .4 (et non de 2.5 comme utilisée pour l'analyse présentée dans ce rapport). Ils montrent que si les coûts d'exploitation des véhicules sont pris en compte, l'état général de la route aura un effet plus important sur l'analyse.

Conclusions de l'analyse économique

Dans le cas de modélisation standard avec les hypothèses décrites, l'analyse économique indique que l'utilisation de couches de roulement à longue durée de vie devrait présenter un avantage économique, si le coût initial était environ trois fois supérieur à celui des revêtements traditionnels et que les volumes de trafic étaient élevés. De manière générale, on peut espérer que le revêtement avancé sera économiquement viable pour un TMJA supérieur à environ 70 000-80 000. Avec des taux d'actualisation inférieurs à 6 %, les couches de roulement à longue durée pourraient être rentables pour un TMJA de 60 000 ou même compris entre 40 000 et 60 000.

Pour l'option de revêtement avancé, la réduction de la VAN par rapport au revêtement traditionnel augmente avec la hausse du trafic ou la baisse du taux d'actualisation. En outre, l'analyse a montré que les couches de roulement d'une durée de vie de 40 ans seraient plus rentables lorsque les coûts pour l'utilisateur seraient pris en compte, car la suppression des perturbations de la circulation dues aux travaux d'entretien présente un avantage significatif.

L'analyse des autres cas que le cas standard ainsi que les analyses de sensibilité réalisées conduisent aux conclusions suivantes :

- Il est probable qu'on obtient au moins quelques réductions de coûts sur les routes à forte circulation (TMJA supérieur à 80 000), avec tous les taux d'actualisation évalués.
- Les réductions de coûts augmentent avec la hausse du pourcentage de poids lourds (en supposant que celle-ci entraîne une augmentation des coûts pour l'utilisateur), puisque les revêtements avancés réduisent les coûts dus aux perturbations de la circulation. Toutefois, dans l'analyse, le pourcentage de poids lourds a un effet sur la VAN inférieur aux prévisions. Cela est dû essentiellement au fait que l'impact du pourcentage de poids lourds n'est pris en considération que dans le calcul des coûts du temps perdu. L'analyse ne prend pas en compte les effets sur les besoins d'entretien.

Bien qu'il existe, selon l'analyse, des circonstances évidentes dans lesquelles les couches de roulement à longue durée de vie pourraient être économiquement viables, il existe aussi visiblement de nombreux cas dans lesquels les options de revêtements avancés ne permettront sans doute pas une réduction des coûts sur la durée de vie. Ainsi, à partir de l'analyse et des graphiques, on peut faire les observations suivantes :

- Le taux d'actualisation a un effet significatif sur les résultats et seuls les projets routiers à forte circulation bénéficient d'une réduction des coûts lorsque le taux d'actualisation est de 10 %.
- On ne peut espérer que les chaussées d'un coût élevé (cinq fois supérieur au coût des chaussées traditionnelles) soient économiquement viables, sauf si le taux d'actualisation est très faible (3 %) et que le volume de trafic est élevé.

- Pour un trafic journalier inférieur ou égal à environ 60 000 véhicules, l'utilisation du revêtement avancé ne permettra pas une réduction des coûts sur la durée de vie, sauf si les taux d'actualisation sont faibles (3 % par an).
- Lorsque le volume de trafic journalier est d'environ 40 000 véhicules, l'expérience laisse à penser qu'il y aura peu de situations offrant une réduction des coûts, et même lorsque celle-ci sera indiquée par le modèle, il est possible qu'elle ne se produise pas.

De manière générale, les valeurs et les hypothèses utilisées dans l'analyse sont considérées comme prudentes. Bien que certaines des hypothèses émises puissent faire l'objet d'un débat, il a été démontré que les résultats étaient relativement fiables pour toute une série de valeurs et que de légers ajustements ne pourraient pas modifier les principales conclusions.

Les routes prises en considération dans l'analyse sont supposées être dans un bon état général, bénéficiant d'une structure solide et d'une surface unie. Pour les routes qui ne présentent pas ces caractéristiques et dont la surface, moins unie, a une valeur IRI plus élevée, comme cela peut être le cas dans certains pays d'Europe orientale, les coûts d'exploitation des véhicules deviennent un facteur plus déterminant. Une valeur IRI élevée peut être révélatrice d'une couche d'assise moins solide. La structure de la chaussée peut nécessiter une remise en état avant d'envisager une couche de roulement à longue durée de vie.

Implications possibles pour les différents pays

Les résultats de l'analyse indiquent que les traitements de surface avancés peuvent présenter un avantage économique pour les pays possédant des routes à forte circulation, notamment s'ils utilisent des taux d'actualisation modérés ou faibles pour évaluer la viabilité d'un projet.

L'analyse est fondée sur des valeurs représentatives, pour les traitements traditionnels, et sur des valeurs estimées (à partir des connaissances techniques), pour les couches de roulement avancées. Elle ne constitue donc qu'une indication en matière de réduction des coûts sur la durée de vie. Concernant les différents pays, il convient de noter les éléments suivants :

- Les données d'entrée telles que l'utilisation des options de gestion du trafic varient d'un pays à l'autre.
- Les coûts pour l'utilisateur jouent un rôle important dans l'analyse, mais les pratiques d'évaluation diffèrent selon les pays.
- Chaque pays devrait réaliser une analyse similaire à l'aide de ses données sur les coûts et les rendements, les volumes de trafic et les options de gestion du trafic, les coûts d'exploitation des véhicules et les coûts pour l'utilisateur, et enfin, les taux d'actualisation.

Pour effectuer une évaluation réaliste des coûts sur une longue période, une analyse plus détaillée pourrait être réalisée par chaque pays, pour examiner de manière plus

approfondie certaines variables évoquées dans ce rapport. Cette analyse ultérieure pourrait inclure les éléments suivants :

- Utilisation des données de coûts réels de chaque pays pour le revêtement traditionnel, au lieu de la seule valeur « représentative », adoptée dans les évaluations du cas test standard.
- Autres variations dans les profils d'entretien prévoyant différents volumes de trafic et pourcentages de poids lourds.
- Meilleure estimation des conséquences de l'utilisation du revêtement avancé.
- Effet de l'état de la chaussée existante sur les performances à long terme du revêtement avancé, en particulier lorsque l'état structurel ou l'uni sont médiocres.
- Examen approfondi des aspects économiques du revêtement avancé sur une gamme plus large de types de routes, de volumes de trafic, de taux d'actualisation et de périodes d'évaluation.
- Sensibilité à d'autres modalités de gestion du trafic, conditions et horaires de travaux.
- Sensibilité des coûts pour l'utilisateur aux valeurs du temps et aux calculs des temps d'attente sur les routes en travaux.

Chapitre 5

Chaussées de nouvelle génération pour routes à forte circulation

Ce chapitre examine plusieurs types de couches de roulement qui ont été mises au point pour résister à de fortes charges avec un entretien minimal. Ces couches de roulement sont généralement mises en œuvre dans des projets de petite échelle et ne sont pas nécessairement adaptées à un usage généralisé. Deux matériaux ont été sélectionnés comme ayant un potentiel de développement pour construire des couches de roulement à longue durée de vie et pourraient être examinés plus en détail.

Introduction

L'arrivée d'une nouvelle génération de chaussées nécessitera un effort conjoint des fabricants, des maîtres d'œuvre et des gestionnaires. La longue durée de vie d'une chaussée dépend de trois facteurs : une bonne conception, de bons matériaux et une mise en œuvre réussie. La défaillance d'un de ces éléments compromettra gravement la longévité de la chaussée et conduira à une dégradation et à des ruptures prématurées.

La mise au point d'une couche de roulement d'une durée de vie de conception de 30, 40, voire 50 ans exigera des efforts de recherche importants. Les modèles fondés sur les performances actuellement utilisés sont conçus pour des périodes plus courtes et ne permettront pas nécessairement de réaliser des extrapolations pour des prédictions à si long terme. De meilleurs outils de caractérisation et de prédiction des charges de trafic et des effets sur l'environnement sont donc nécessaires. Les réactions chimiques et les conditions physiques associées au vieillissement et à l'érosion des chaussées doivent être intégrées à des essais mécaniques basés sur les performances, généralement employés dans l'analyse de chaussées.

Ce chapitre décrit les propriétés et les modes de production de différents matériaux et systèmes de revêtement capables de satisfaire aux exigences de performance sévères, nécessaires à une couche de roulement de longue durée. La description d'un produit ne doit pas être considérée comme une recommandation, mais comme une reconnaissance de l'existence de données sur les performances.

Pyramide des relations

Les relations nécessaires pour établir les couches à longue durée de vie peuvent être illustrées comme sur la figure 5.1. Cette pyramide représente le triangle

traditionnellement constitué par les matériaux, la conception et la construction. Elle comprend également les usagers et les aspects fonctionnels.

En haut de la pyramide figurent les questions liées à la société. Elles comprennent les questions relatives aux usagers telles que le confort, la pérennité, les coûts et l'accessibilité, ainsi que les questions relatives aux fonctions telles que les points de vue des automobilistes et des gestionnaires. Les critères de performances pour les automobilistes sont les suivants :

- Conduite (confort/uni).
- Adhérence.
- Bruit de roulement.
- Projections d'eau.
- Réflectivité.
- Tolérance aux déversements de produits chimiques.

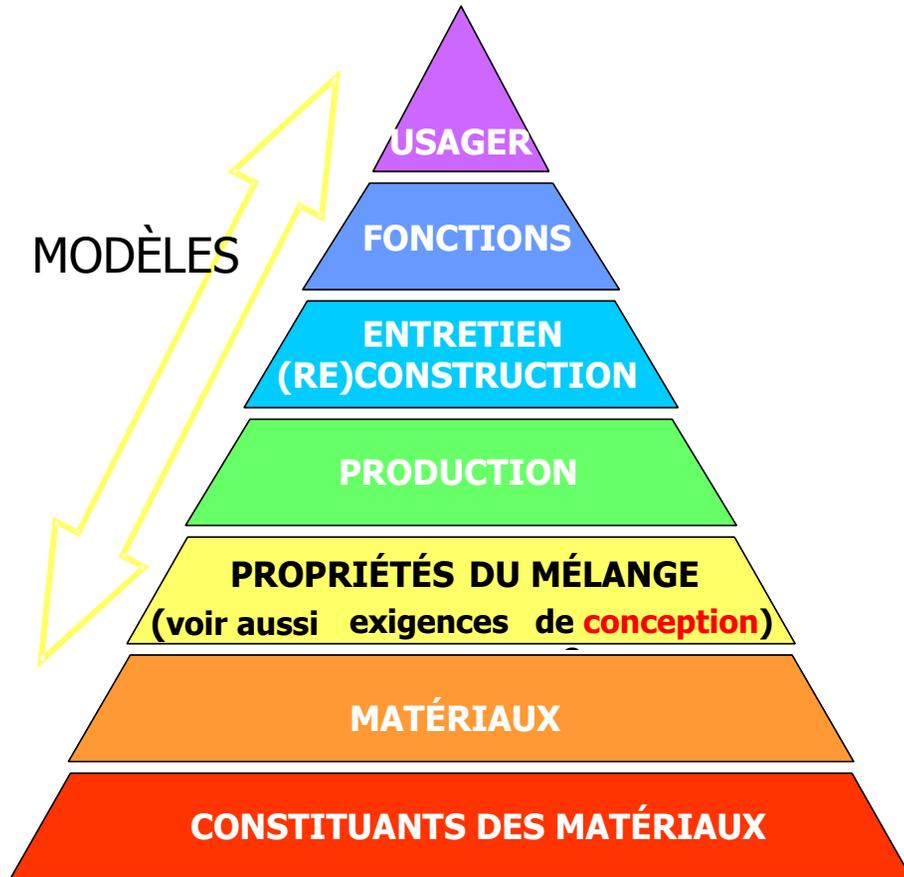
Les attentes de la société et les conditions climatiques déterminent en grande partie ces critères de performances. Les ingénieurs peuvent directement mesurer les propriétés citées, mais fondent également leurs appréciations sur les différents éléments liés à la dégradation et aux défaillances, comme les suivants :

- Fissuration.
- Orniéage (déformation superficielle longitudinale dans les traces de roues).
- Plumage (perte de granulats).
- Décalage (différence de hauteur au bord d'un joint ou d'une fissure).
- Écaillage (dégradation superficielle des chaussées en béton).
- Polissage (réduction du frottement superficiel).
- Orniéages dues aux pneus cloutés.
- Décollement et délamination (perte de liaison mécanique entre deux couches superposées, telles que la couche de roulement et la couche de liaison).

Aux étages inférieurs, figurent les questions liées au maître d'œuvre, qui se posent lors de la production et de la construction des chaussées ou pendant l'entretien et la reconstruction. Les questions de construction portent généralement sur l'épaisseur de la chaussée, la préparation de la surface, les délais de construction (temps de prise, s'il y a lieu), le mode de construction, l'environnement de la chaussée, les contraintes de charge, la géométrie, ainsi que le contrôle du trafic et la sécurité (opérateurs et automobilistes). Pendant la reconstruction et l'entretien, les mêmes questions se posent, mais quelques autres requièrent également de l'attention. En effet, ces aspects représentent une part importante de l'entretien, mais il faut aussi examiner d'autres points tels que les différents types de recyclage, la fréquence et la difficulté des réparations, ainsi que les aspects environnementaux. Enfin, les questions de production comprennent le malaxage, la

manutention, le transport, le compactage, ainsi que les contraintes d'ordre environnemental, de température, de délais et de charge pendant la prise.

Figure 5.1. Pyramide des relations conceptuelles pour les couches de roulement à longue durée de vie



Source : D'après J. Th. van der Zwan.

Aux trois étages inférieurs de la pyramide, figurent les questions liées à la conception et à la sélection des matériaux de chaussées. Les propriétés du mélange reflètent essentiellement les paramètres de formulation et comprennent la résistance, le coût, la température, la maniabilité, la teneur en vides, le module et le retrait. La plupart de ces propriétés sont réunies dans les procédures de conception existantes. Ainsi, le béton bitumineux peut employer le modèle américain Superpave pour lier le trafic aux propriétés du mélange. Les questions relatives aux matériaux comprennent la granularité, la volumétrie et la finesse des matériaux. Les constituants des matériaux sont en grande partie déterminés par leur composition chimique et leur impact sur les propriétés physiques et mécaniques. Les matériaux bitumineux, les bétons, les granulats, l'eau et les liants synthétiques en sont des exemples. Étant donnée la diversité des types de matériaux disponibles et en cours de développement, il conviendrait d'examiner les questions de santé et de risques d'incendie liées à chaque étape de leur utilisation.

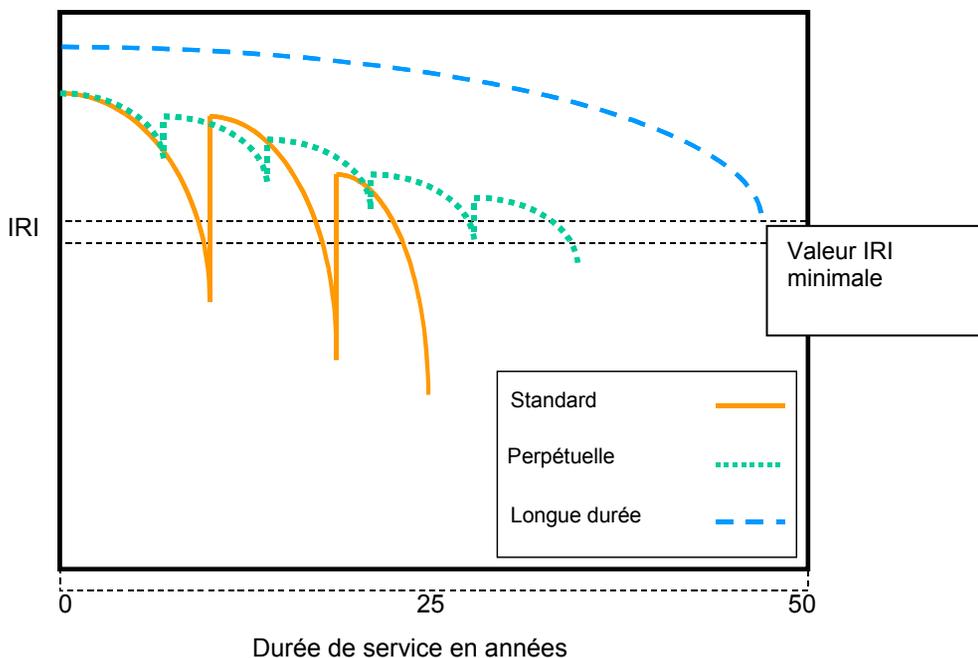
Les relations entre les différents étages de la pyramide ont été prises en compte afin de proposer un choix de matériaux pour la phase suivante de l'étude.

Performances

Comme on l'a vu au chapitre 2, les couches de roulement peuvent durer généralement cinq ans, pour les chaussées bitumineuses, et 20 ans pour les chaussées en béton. Passé ce délai, une opération d'entretien peut être nécessaire si un ou plusieurs paramètres fonctionnels déterminants réclament une mesure curative. Par exemple, si la diminution des performances se limite à une perte d'adhérence, seule une régénération de la surface peut être nécessaire. En revanche, un orniérage excessif peut demander une stratégie d'entretien plus importante, telle que le fraisage et la thermorégénération de la chaussée.

Pour chaque paramètre fonctionnel, un scénario de performances avec fixation de délais peut être élaboré. Le confort au roulement ou l'uni est un des paramètres physiques influant directement sur la dégradation de la route : lorsque le confort au roulement diminue, l'usure de la route s'accélère. Cette règle est illustrée sur la figure 5.2.

Figure 5.2. Relations théoriques entre la durée de service et l'IRI pour chaussées standard, perpétuelles et à longue durée de vie



Source : Auteur.

Lorsque le niveau de la chaussée baisse au-dessous des valeurs établies, des travaux réalisés en fonction de la stratégie d'entretien peuvent rétablir les performances presque à leur niveau initial. Les procédures d'entretien ultérieures seront probablement moins efficaces pour limiter les dégradations ; la chaussée devra alors être remplacée. Un des principes fondamentaux des chaussées perpétuelles ou des stratégies de préservation est

d'anticiper et d'adopter des politiques d'entretien avant que les chaussées n'atteignent un niveau de dégradation critique. L'important est de s'intéresser aux causes et non aux symptômes. Cette stratégie doit allonger la durée de vie de la chaussée et offrir à l'utilisateur un meilleur confort au roulement. La solution longue durée ou de non-intervention consiste à employer des matériaux plus performants, de meilleure qualité et nécessitant moins d'entretien sur une durée de service plus longue. Il est important d'associer la fin de la durée de vie à une limitation des conditions d'exploitation.

Examen des matériaux avancés

La plupart des informations relatives aux matériaux avancés examinés dans ce chapitre sont fondées sur leurs performances comme couches de roulement de tabliers de ponts. Ces matériaux sont beaucoup plus coûteux que ceux utilisés dans la production de chaussées bitumineuses ou en béton classiques. Leur utilisation dans les tabliers de ponts se justifie pour une ou plusieurs des raisons suivantes : durée de vie plus longue, résistance à des tensions élevées, protection du tablier du pont et aspects structurels. Ainsi, l'obtention de résistances comparables avec une épaisseur de chaussée réduite permet de réduire le poids propre du pont. La plupart de ces raisons sont valables pour les couches de roulement à longue durée de vie, ce qui justifie d'étudier les perspectives d'utilisation de ces matériaux.

Tous les matériaux de chaussées peuvent être classés dans l'une des quatre principales catégories suivantes : bitumineux, béton, composites et synthétiques. Les produits finaux peuvent avoir des caractéristiques semblables à celles des chaussées souples, rigides ou intermédiaires, comme le montre la figure 5.3. La tendance générale est à l'augmentation de la résistance des systèmes souples et à l'augmentation de la souplesse des systèmes rigides.

Figure 5.3. Grandes classes de matériaux de chaussées



Source: Auteur.

Liants bitumineux (chaussées souples)

Les liants bitumineux modifiés sont fabriqués par de nombreux procédés différents. Ils sont généralement obtenus par soufflage d'air avec ajout d'acide polyphosphorique ou d'un autre réactif, ou par introduction de polymères. Cette discussion se limitera à la modification aux polymères, dans la mesure où le simple traitement du liant ne semble

pas produire de matériaux aux propriétés nécessaires pour une chaussée à longue durée de vie.

La modification aux polymères du liant bitumineux peut être réalisée par trois procédés : on mélange le polymère au liant, on fait réagir le polymère avec le liant ou bien on utilise un polymère réactif pour polymériser le liant.

Le *mélange* désigne le mélange mécanique du polymère avec le liant bitumineux. Les polymères élastomériques tels que le SBS (styrène-butadiène-styrène) sont généralement compatibles avec le liant et se dispersent dans le bitume. En revanche, les polymères plastomériques tels que l'EVA (éthylène-acétate de vinyle) et le PE (polyéthylène) tendent à se séparer. Cela signifie qu'il se forme des zones riches en polymères et d'autres zones riches en bitume. Les propriétés rhéologiques de ces zones sont assez différentes ; la dispersion du polymère dans le bitume doit donc être résolue par mélange en ligne ou par agitation mécanique avant la production du bitume.

Les *polymères obtenus par réaction* sont les systèmes qui lient ou font réagir chimiquement le polymère avec les molécules polaires (asphaltène) dans le liant bitumineux. Ils sont obtenus par vulcanisation (avec du soufre ou des composés sulfurés) ou par incorporation d'espèces réactives dans le polymère. Le polymère se greffe ou se connecte au bitume, ce qui améliore la dispersion du polymère dans le bitume. La greffe réduit aussi la réactivité du bitume modifié à la dégradation par oxydation, puisque la plupart des phénomènes chimiques se produisent sur les sites réactifs du bitume. Telle est la principale méthode d'incorporation de polymères, à l'heure actuelle.

Les *polymères réactifs* sont les systèmes subissant des réactions de polymérisation. Le bitume époxy en est un exemple (les liants synthétiques le sont pour les matériaux non bitumineux). La plupart des sites réactifs du bitume sont chimiquement liés (réticulés) au polymère. Ces matériaux présenteront donc une excellente résistance aux agressions chimiques et environnementales. Ils sont très réticulés et nécessitent un temps de prise. Les essais et les performances ressemblent plus à ceux des chaussées rigides. Un équipement et des opérations spécifiques sont nécessaires.

Les charges élevées en polymères mélangés ou réactifs sont appropriées pour résoudre les problèmes rhéologiques ou de résistance (déformation et fissuration permanentes), mais pas les problèmes chimiques liés au vieillissement, au désenrobage ou à l'humidité. Il existe de nouveaux polymères tels que le SEBS (styrène-éthylène-butylène-styrène), plus coûteux et plus résistants à l'oxydation, mais qui ont été relativement peu testés dans le domaine des chaussées. En outre, la viscosité de ces bitumes modifiés demande un contrôle précis de la température, des délais, du malaxage et du compactage, que les finisseurs actuels ne peuvent pas assurer. Or, une charge élevée en polymères peut entraîner une augmentation de la viscosité et des problèmes importants de manutention et de mise en œuvre, notamment pour les opérations manuelles. C'est pourquoi l'intérêt du bitume doit se porter sur la modification aux polymères réactifs.

Bitume époxy

Le liant bitume époxy est un système chimique thermodurcissable constitué de deux phases : un époxy acide à prise lente (phase continue) est mélangé à un bitume classique

(phase discontinue). Les composants de ce liant sont prémélangés dans un pétrin à asphalte avant d'être associés à des granulats chauds dans un poste d'enrobage discontinu classique. La mise en œuvre et le compactage du revêtement sont réalisés à l'aide d'un finisseur classique. Le bitume époxy est appliqué sur une couche d'accrochage en bitume époxy plus visqueuse, pulvérisée à chaud. Bien que la chaussée puisse être ouverte à la circulation dès qu'elle a refroidi à la température ambiante, le temps de prise du bitume époxy est de deux à six semaines.

Les propriétés chimiques et physiques du liant et de la couche de liaison sont indiquées dans les tableaux 5.1 et 5.2, et celles du bitume époxy figurent dans le tableau 5.3. Une fois polymérisé, le liant bitume époxy se comporte comme un polymère thermodurcissable. Il ne ramollit pas comme les bitumes classiques à des températures élevées ; les risques de ressuage et/ou de coulure du liant sont donc éliminés, pour la plupart. Cela permet la formulation de mélanges à faible teneur en vides (objectif <3 % de vides), et donc la réalisation d'une couche imperméable.

Tableau 5.1. Propriétés chimiques du liant et de la couche d'accrochage en époxy

Propriété	Valeur d'essai		Méthode d'essai
	Liant	Couche d'accrochage	
Composant en résine			
Équivalent époxyde	185 à 192	185 à 192	ASTM D1652
Viscosité en Pa.s, à 23 °C	10 à 16	10 à 16	ASTM D445
Point éclair minimal en °C	204	204	ASTM D92
Gravité spécifique	1.16 à 1.17	1.16 à 1.17	ASTM D 1475
Agent de cure/bitume			
Valeur acide, en mg KOH/g	44 à 55	44 à 55	ASTM D664
Viscosité à 99°C, en Pa.s	.140 à .250	1.2 à 1.6	Brookfield HBT
Point éclair minimal en °C	204	271	ASTM D 92
Gravité spécifique	1.00 à 1.01	1.00 à 1.01	ASTM D 1475

Source: Gaul (1993).

L'historique des performances de ce matériau est limité aux tabliers de pont. Plus de 50 000 tonnes ont été appliquées sur les tabliers de ponts en acier et en béton depuis 1967. Les climats dans lesquels ce matériau a été mis en œuvre varient entre -10°C et 33°C. Parmi les utilisations les plus anciennes, citons le revêtement de la travée du tablier en acier orthotropique du pont San Mateo-Hayward, au-dessus de la baie de San Francisco, réalisé en 1967. Il est encore en excellent état et ne présente que quelques dégradations mineures. Notons que le climat est plutôt doux : peu ou pas de gel et aucune utilisation de sels de déverglage. La chaussée est toutefois exposée à un fort rayonnement UV.

Tableau 5.2. Propriétés physiques du liant et de la couche d'accrochage en époxy

Propriété	Valeur d'essai		Méthode d'essai
	Liant	Couche d'accrochage	
Résistance minimale à la traction à 23 °C, en MPa	1.4 – 2.1	4.8-9.0	ASTM D 412
Allongement minimal à la traction à 23 °C, en %	175-300	175-225	ASTM D 412
Absorption maximale d'eau à 25 °C, en %	0.3	0.3	ASTM D 570
Température de déflexion, en °C	-25 to 0	-18 to -15	ASTM D 648

Source : Gaul (1993).

Pour une mise en œuvre réussie, l'attention doit être portée sur une formulation adaptée et l'utilisation de granulats appropriés. Le malaxage a été réalisé en centrale discontinue pour assurer le respect des exigences et des proportions des composants. Le contrôle de la température du granulat (entre 143° et 154°C) et un compactage précoce (précompactage avant baisse de la température au-dessous de 82°C et surfacage avant baisse de la température du revêtement au-dessous de 66°C) sont aussi déterminants que l'utilisation d'une couche d'accrochage aux bonnes propriétés adhésives.

Tableau 5.3. Propriétés physiques du bitume époxy

Propriété	Valeur d'essai			Méthode d'essai
	Bitume époxy après cure initiale	Bitume époxy après cure finale	Bitume	
Stabilité Marshall	540 à 630	3 600 à 6 300	1 125	ASTM D 1559
à 60°C, kg, valeur de fluage à 60°C, mm	2.0	2.0	2.8	
Retour minimal, en %	0	60	0	
Stabilité Marshall				ASTM D 1559
à 204 °C, en kg		1 800	Fluide	
Propriétés en compression à 25°C				ASTM D 695
Résistance, en MPa	n.d.	23.4	n.d.	
Module d'élasticité, en MPa	n.d.	1 150	n.d.	
Propriétés en flexion à 25°C				ASTM C 293
Module de rupture, en MPa	n.d.	4.4	56	
Module d'élasticité, en MPa	n.d.	2 618	n.d.	
Déflexion maximale, en mm	n.d.	3.8	3.0	
Teneur en vides, en %	1 à 2	1 à 2	3 à 5	ASTM D 2041

Note : n.d. = non disponible.

Source : Gaul (1993).

Il existe un certain nombre de questions liées à la pose, contribuant au coût élevé ou à la durée de mise en œuvre de ce matériau. La production actuelle est de l'ordre de 60 tonnes/h (1.60 km de voie/poste de 8 h). Les éléments expliquant la lenteur sont le dosage, le malaxage et l'épandage du liant et de la couche de liaison, notamment parce

que ces opérations nécessitent une main d'œuvre importante. Le procédé utilise les techniques des postes d'enrobage discontinu (quantités limitées de 2 à 4 tonnes par gâchée de malaxage), alors que la plupart des centrales d'enrobage évoluent vers des postes d'enrobage continu. Le temps est limité entre la fin de la prise et le moment où il ne sera plus possible de compacter correctement le mélange. La durée de transport possible dépend de la température moyenne de la gâchée dans le malaxeur. À une température de 116°C, la durée de transport minimale est de 42 minutes et la durée maximale, de 62 minutes. À 127°C, cette fenêtre se réduit à entre 35 et 43 minutes. Enfin, pendant la polymérisation, de deux à six semaines, le bitume époxy risque de couler.

Par rapport aux enrobés bitumineux classiques, le bitume époxy peut résister à des tensions beaucoup plus importantes et présente, en conséquence, une bien meilleure résistance à la fatigue. Sa résistance élevée au cisaillement se rapproche de celle du béton, lui assurant ainsi une grande résistance à l'orniérage. Son module élastique est à peu près égal à 1/10^e de celui du béton de ciment Portland (BCP), ce qui contribue à sa résistance aux ruptures par cisaillement.

Lorsque le matériau est bien construit, il y a une bonne adhérence avec la couche d'assise et les modes de dégradation sont semblables à ceux du béton de ciment. Ce sont les suivants : dégradations dues au feu (liées aux incendies de véhicules), nids-de-poule, effritement des joints et perte d'adhérence. En outre, la dilatation thermique n'étant pas identique à celle du béton, il peut se produire un décollement entre l'enrobé époxy et la couche inférieure.

Les questions de santé et de sécurité sont légèrement plus importantes dans la fabrication de cet enrobé bitumineux que dans celle du bitume classique sur une centrale d'enrobage. La manipulation des résines avant le mélange exige un certain soin. Le personnel chargé de préparer l'époxy doit utiliser des appareils respiratoires (masques). Après le mélange, les conditions de manipulation du liant sont identiques. En raison de la durée de mise en œuvre de la couche d'accrochage, les opérateurs sont plus longtemps exposés aux fumées. Les questions liées à la pose sont les mêmes que pour le bitume classique.

Pour progresser dans l'utilisation de ce matériau ou d'autres similaires, il convient d'effectuer de meilleurs essais de glissance et d'élaborer des modèles de prédiction du frottement dans le temps ou du niveau de charge. En outre, les modèles d'évaluation des caractéristiques en matière de projections d'eau et de bruit doivent être améliorés.

Actuellement, les coûts en matériaux avec bitume époxy sont de l'ordre de 22 USD/m². Les frais de centrale discontinue sont proches de 11 USD/m². La mise en œuvre coûte environ 11 USD/m². Le coût total s'élève à près de 44 USD/m².

Chaussées rigides

Les matériaux utilisés dans la construction des chaussées rigides peuvent être regroupés en deux catégories : le béton de ciment Portland et les bétons à hautes performances (BHP).

Béton de ciment Portland

Parmi les matériaux de chaussées classiques, le béton de ciment Portland offre résistance et durabilité. On évalue actuellement de nouvelles solutions telles que les resurfaçages et les rechargements non adhérents, qui pourraient concurrencer les solutions bitumineuses traditionnelles. L'utilisation d'une plus grande part de ciment recyclé par unité de surface pourrait faire baisser le coût initial. Par ailleurs, l'utilisation de panneaux de béton préfabriqués pourrait réduire les délais de construction et les temps d'attente pour l'utilisateur.

Toutefois, ce sont les questions liées à la société, plutôt qu'à la technique, qui limitent souvent l'utilisation du béton de ciment Portland. La rigidité de la structure de la chaussée et la texture superficielle produisent un niveau de bruit plus élevé. Les joints contribuent souvent à une perte d'uni. Les améliorations dans le contrôle qualité de la déclivité se sont traduites par la fabrication d'un béton de ciment Portland plus uni, réduisant le bruit produit par les joints. Des surfaces striées et texturées ont été utilisées pour réduire respectivement les projections d'eau et le bruit. Une autre méthode a consisté à modifier le béton de ciment Portland par la construction de chaussées poreuses, qui lui apportent quelques propriétés initiales d'absorption ou de dissipation. Mais lorsque ces pores sont bouchés ou colmatés par des débris, l'atténuation du bruit peut se dégrader avec le temps. La France a expérimenté la mise en œuvre de chaussées en béton de ciment Portland épais et poreux, moins bruyantes.

La porosité du béton de ciment Portland peut être améliorée par plusieurs méthodes. La pâte de ciment hydratée peut être modifiée par l'utilisation d'entraîneurs d'air. On peut aussi employer des granulats à granulométrie discontinue ou des mélanges à faible teneur en sable. D'autres solutions consistent à utiliser des granulats poreux et à inclure des particules de caoutchouc. L'inclusion de fibres de faible rigidité ou de polymères permet de réduire la rigidité de la chaussée et d'accroître la capacité d'amortissement visqueux du béton. Ces inclusions (air et/ou particules de caoutchouc) absorbent le son, mais diminuent aussi le module élastique. Il convient de prendre soin à la construction de ces bétons, pour minimiser la ségrégation et la réduction de la résistance.

Les ruptures prématurées du béton de ciment Portland ont été attribuées à différents facteurs dont plusieurs sont :

- Cycle de gel/dégel de la chaussée.
- Attaque sulfatique (interne et externe).
- Réaction alcali-granulat.
- Corrosion de l'acier d'armature.

Il a été démontré que l'ajustement des techniques de construction de chaussées ou l'utilisation de granulats de différentes duretés permettaient de construire une chaussée d'une adhérence plus élevée.

Bétons à hautes performances (BHP)

Cette classe de matériaux comprend un grand nombre de produits. Les mortiers de poudres réactives et les bétons de poudres réactives sont deux types de produits faisant actuellement l'objet de nombreux essais. Leurs noms commerciaux sont MSCC et Cemtec®. Il s'agit de systèmes à fumée de silice superplastifiés, renforcés de fibres et d'une résistance exceptionnelle, caractérisés par un rapport eau-ciment très faible. La plupart sont extrêmement homogènes en raison du remplacement du granulats traditionnels par du sable très fin dont les tailles de particules sont comprises entre 150 et 400 µm. Bien que ces matériaux n'aient pas été conçus pour le marché des chaussées, leur résistance élevée à la traction et à la compression, ainsi que leur indice de porosité extrêmement faible indiquent qu'il s'agit de matériaux très durables. Leur faible porosité permettra de réduire sensiblement les facteurs de rupture prématurée du béton de ciment Portland, mentionnés plus haut.

Le coût élevé de ces matériaux est l'obstacle le plus important à leur utilisation. La plupart de ces produits contiennent des fibres d'acier, des superplastifiants et autres adjuvants tels que des accélérateurs, selon une teneur quatre à six fois supérieure à celle utilisée pour les mélanges de béton habituels. Le contrôle de la prise permet d'améliorer sensiblement les performances de ces matériaux, mais accroît également leur coût. Ce seront donc des produits très coûteux à court terme. En raison de leur rapport eau-ciment très faible, certains de ces matériaux sont très visqueux, ce qui rendra leur manutention et leur mise en œuvre plus difficiles. Une comparaison de la composition et des propriétés des BHP et des bétons de ciment Portland figure au tableau 5.4.

Tableau 5.4. Compositions et propriétés mécaniques des bétons à hautes performances et des bétons de ciment Portland courants

Type de ciment	Bétons à hautes performances	Bétons de ciment Portland
Rapport eau-ciment	<.2	<.5
Nombre de fibres différentes	1-3	0
% de fibres	11	0
Superplastifiants (% de la dose de ciment)	1-2	0-1
Fumée de silice (% de la dose de ciment)	20-25	0-10
Perméabilité (m ²)	10 ⁻¹⁸ -10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹⁷ -10 ⁻¹⁶
Résistance à la traction	8-20 MPa	
Résistance à la compression	200-230 MPa	80-100 MPa
Résistance à la compression	40 MPa	7 MPa
Résistance à la fracture	30 x 10 ³ J/m ²	<1 x 10 ³ J/m
Abrasion	1.2 x 10 ⁻¹² m ² /s	275 x 10 ⁻¹² m ² /s

Source : Kosmatka *et al.* (2002).

Une des caractéristiques des BHP composites est leur faible perméabilité. Cette particularité réduira ou éliminera des facteurs qui entraînent souvent des ruptures prématurées. Malheureusement, ces matériaux comportent aussi une série de problèmes

particuliers dont les plus importants sont les caractéristiques de frottement et de bruit. L'homogénéité des ciments composites n'élimine pas seulement les problèmes de ségrégation, mais aussi la texture de la chaussée. La nature non poreuse de ces composites devrait améliorer leurs propriétés physiques et réduire les ruptures prématurées, mais aura en même temps un effet défavorable sur l'atténuation du bruit et des projections d'eau. La surface immédiate devra donc être modifiée afin de répondre aux exigences en matière de bruit, de frottement et de projections d'eau.

Les BHP sont relativement nouveaux. Bien qu'ils présentent des propriétés exceptionnelles et qu'ils offrent des perspectives prometteuses pour les chaussées à longue durée de vie, de nombreuses recherches sont encore nécessaires. La détermination des conditions et des temps de prise appropriés pourrait être essentielle pour améliorer cette catégorie de matériaux. Une fois le marché établi, les coûts de ces matériaux devraient baisser. Ils sont actuellement de l'ordre de 200 USD/tonne, soit environ 5 USD/m² pour une couche de chaussée d'une profondeur de 10 mm.

Chaussées composites

Les mélanges composites ont été améliorés pour combiner les avantages des bitumes et des bétons. Ils allient la souplesse et l'absence de joints des enrobés bitumineux à la rigidité et à la résistance des matériaux hydrauliques (Anderton, 2000).

Ce sont généralement des enrobés ouverts, auxquels a été injecté un ciment modifié. Un certain nombre de produits est disponible sur le marché, notamment les revêtements modifiés à la résine, le Densiphalt et le Duraphalt.

L'enrobé ouvert utilisé dans le Densiphalt est un béton bitumineux drainant typique (BBD_r) et possède une teneur élevée en bitume. Des fibres de cellulose sont souvent utilisées pour éviter le ressuage (processus par lequel le liant se sépare du mélange pendant la préparation de l'échantillon en laboratoire, et probablement pendant la mise en œuvre sur place). Le Densiphalt a une teneur en liant bitumineux plus faible. Tous ces produits ont une structure poreuse à 25-30 %. Le mortier utilisé est beaucoup plus fin que celui des bétons de ciment Portland, ce qui permet un tassement plus dense et une réduction générale de la perméabilité de la chaussée. Cette caractéristique apporte une excellente résistance au gel et au dégel tout en améliorant la résistance aux sels de déverglaçage, au pétrole et aux produits chimiques.

Les propriétés physiques des revêtements modifiés à la résine sont indiquées dans le tableau 5.5. Par rapport aux chaussées bitumineuses, ce composé présente un module de rigidité plus élevé, une sensibilité à la température plus faible, une résistance plus élevée à la déformation permanente et une meilleure résistance à la fatigue à des niveaux de déformation plus faibles. Le bitume est mis en œuvre avec un matériel classique et le compactage est effectué à l'aide de compacteurs non vibrants. Le mortier est injecté dans le bitume et répandu manuellement. Sa surface peut être traitée pour améliorer la texture superficielle (adhérence, confort au roulement ou esthétique).

Ce produit est utilisé depuis une dizaine d'années sur les pistes aéroportuaires, routes et ports d'Australie, d'Europe et des États-Unis. Les coûts actuels sont estimés entre 12 et

14.50 USD/m² pour une couche de roulement de 35 mm. En ce qui concerne les performances, les chaussées récemment construites présentent généralement un coefficient de frottement inférieur aux valeurs souhaitées. Ce coefficient s'améliore à mesure que la surface s'use et développe une macrotecture. En ce qui concerne les performances des chaussées à longue durée de vie, les données disponibles sont limitées, puisque ces matériaux composites n'ont pas été mis en œuvre sur les routes à forte circulation.

Ces produits sont relativement imperméables, ce qui devrait atténuer les dommages liés à l'oxydation et à l'humidité. Toutefois, le bitume et l'adjuvant résine constituant les revêtements modifiés à la résine contiennent du caoutchouc butadiène-styrène. Ces deux composants peuvent présenter des réactions d'oxydation. Les effets à long terme sur l'environnement doivent être explorés, notamment les dégradations superficielles telles que la fragilisation et l'arrachement. En outre, une application à long terme du composite dans les climats froids (nordiques), avec périodes de gel et de dégel intense, doit être validée.

Tableau 5.5. Propriétés physiques du Densiphalt

Propriétés techniques	Propriétés physiques	Procédure d'essai
Résistance à la compression	50 MN/m ³ 870 psi (5 jours) 1500 (28 jours) 5-7 MPa (1 jour) 8-12 MPa (28 jours)	BS 1881
Temps de prise (mortier)	8-12 h	EN 196-3
Résistance à la flexion/traction	3.5 MN/m ³ /507 psi	EN 196
Module d'élasticité	8 MN/m ³ 1160-1740 psi 10-14 MPa	DWW 94530
Résistance au gel/dégel	0.01 kg/m ³ /très bonne	SS 137244 méthode IIA
Imperméabilité	Non perméable	DIN 18130
Coefficient de dilatation	12.5 x 10 ⁻⁶ /°C	EN 1770
Résistance à l'usure	6-8 cm ³ /50 cm ²	DIN 52 108
Résistance à l'usure	Jusqu'à 0.75	Stradographe

Source: Duvall (2003).

Liants synthétiques

Nombre de liants synthétiques ont été utilisés pour le revêtement des tabliers de ponts, à travers le monde. Ces liants peuvent être classés parmi les liants époxy, époxy-uréthane et acryliques. Ils sont généralement répandus sur le tablier, puis le granulat est appliqué et compacté sur ce film mince. La plupart de ces couches de roulement sont très minces et imperméables. Les questions liées à la pose et les caractéristiques des matériaux sont similaires à celles du bitume époxy.

L'obtention de bonnes performances dépend des éléments suivants :

- Le vernis d'imprégnation doit présenter une bonne adhérence à la couche de base.

- La viscosité du liant doit être faible, pour permettre la pénétration dans les pores.
- Les gravillons doivent être durables et présenter de bonnes caractéristiques de frottement.

Des accélérateurs sont généralement utilisés pour réduire le temps de prise, qui est comparable à celui du bitume époxy. En termes clairs, le trafic lourd peut être autorisé dans les deux heures et le matériau durcit totalement dans un délai de 24 heures. La seule grande différence réside dans le fait que les liants synthétiques peuvent être mélangés sur place et que « la vitesse de l'horloge » n'est pas aussi déterminante.

Les couches de roulement minces comme celles composées de granulats d'une taille inférieure à 5 mm sont assez imperméables à l'eau et présentent une excellente résistance aux agressions chimiques dues aux sels de déverglaçage, au vieillissement et aux produits chimiques. La durée de vie prévue de ces systèmes est de dix à 20 ans. Parmi les plus minces, certains peuvent se feuilletter lors d'opérations de déneigement.

Les fabricants ont pu formuler ou modifier les matériaux synthétiques existants pour les adapter à toute gamme donnée de températures de chaussée. Italgrip est un produit à base d'époxy, commercialisé dans un grand nombre d'environnements différents, pour ses propriétés de frottement. Une mince pellicule de liant est répandue sur la surface existante et des laitiers cristallisés (de 1 à 4 mm) y sont appliqués. Ce produit apporte une macrotecture superficielle et présente, en outre, l'avantage de réduire les projections d'eau et le bruit. Il est facile à mettre en œuvre et durcit en quatre à six heures. Son coût est de l'ordre de 20 USD/m². Il a été expérimenté aux Pays-Bas avec des couches de roulement poreuses synthétiques. Les chercheurs néerlandais se sont penchés sur la perte d'adhérence et la réduction du bruit. Aucune remarque n'a été faite sur le taux de colmatage de la matrice poreuse.

Les limitations des liants synthétiques sont généralement liées à leur mise en œuvre. Les formulations actuelles peuvent être sensibles à l'humidité avant d'avoir parfaitement durci. La pose doit donc être interrompue si les conditions météorologiques sont défavorables, voire sévères. L'application du vernis d'imprégnation, qui nécessite une main d'œuvre importante, est longue.

Granulats

La longévité de la couche de roulement dépend finalement de la liaison la plus faible. En effet, la qualité du granulat est aussi déterminante que celle du liant. Il faut un granulat dur, résistant au polissage et durable compte tenu des conditions environnementales et de charge. Sa granularité et ses propriétés doivent être cohérentes et conformes aux paramètres de conception. Des informations relatives à la morphologie du granulat et à son impact sur sa résistance, la rigidité du mélange, sa réactivité et la réactivité avec le liant sont nécessaires. Les essais normalisés sur les granulats concernent les caractéristiques physiques telles que la résistance (essai d'abrasion Los Angeles, EN 1097-2), la taille, le coefficient de dilatation thermique, ainsi que les caractéristiques de performances telles que les propriétés d'adhésivité et de frottement (Saarela, 1993).

L'importance du granulat est mise en évidence par les données sur les performances présentées au chapitre 2. La Suède mentionne l'utilisation d'un granulat plus durable que celui de la Norvège ou de la Finlande (Jacobson, 1997 ; Gustafson, 1997). La durabilité du granulat devient particulièrement importante en cas d'utilisation de pneus cloutés. L'orniérage dû aux pneus cloutés, sur les routes à forte circulation, constitue une des principales formes de dégradation des chaussées dans les climats froids, notamment en Norvège où les pneus cloutés sont même utilisés par les camions. Au milieu des années 90, sur les routes suédoises d'un trafic moyen journalier annuel supérieur à 4 000, l'usure par les pneus cloutés (estimée à 300 000 tonnes) représentait la principale cause d'orniérage (50-70 % du total) (Gustafson, 1997). Depuis, elle a sensiblement diminué grâce à l'utilisation croissante de chaussées à hautes performances (asphalte coulé gravillonné avec granulat à résistance élevée à l'usure) et de pneus légèrement cloutés. À la fin des années 90, l'usure totale des routes suédoises a été estimée à 130 000 tonnes en hiver (Jacobson, 1997, 1999 ; Gustafson, 1997). Toutefois, l'effet sur l'environnement de la quantité de bitume arraché suscite encore des interrogations. Un modèle a été mis au point et validé en Suède, pour la prédiction de l'orniérage (Jacobson et Wågberg, 1998). Les paramètres d'entrée sont les caractéristiques du mélange, le volume de trafic avec pneus cloutés, la géométrie de la route et les conditions climatiques.

La résistance du revêtement aux effets des pneus cloutés est donc un des paramètres les plus importants dans les procédures de formulation des mélanges, dans tous les pays scandinaves, à l'exception du Danemark. Il a été démontré que les paramètres suivants avaient une influence considérable sur la résistance à l'usure de la couche de roulement :

- Qualité des plus gros granulats.
- Teneur en plus gros granulats.
- Taille maximale du granulat.
- Impact des pneus cloutés, lié à la vitesse des véhicules et à la masse des pneus cloutés.
- Abrasion et rayures dues aux pneus cloutés.
- Humidité et volume de trafic.

Il existe également une hypothèse selon laquelle l'usure augmente avec la perte d'adhésivité entre le granulat et le bitume. Le liant pourrait donc avoir un effet important sur la résistance à l'usure des couches de roulement. Il a été dit (Saarela, 1993) que le type de bitume pouvait améliorer la résistance à l'usure des revêtements bitumineux denses si l'on choisissait un bitume mou plutôt que dur ou si l'on utilisait un liant modifié pour les essais à température modérée. Cet effet n'a pas paru significatif lors d'essais sur un asphalte coulé gravillonné. Cependant, en milieu froid (-15°C environ), l'amélioration s'avère importante avec un liant modifié, alors que le liant conventionnel se fragilise. Un autre facteur important en matière de résistance à l'usure est l'effet de l'humidité, à peu près constante pendant tout l'hiver. La résistance à l'usure du béton bitumineux est sensiblement réduite en milieu humide. L'utilisation d'un revêtement à hautes performances avec un liant synthétique qui ne risque pas de se fragiliser à basse

température et qui présente de bonnes caractéristiques d'adhésivité en milieu humide pourrait améliorer sensiblement les propriétés d'usure.

Le Danemark a évalué l'utilisation de sables fins (1-3 ou 3-5 mm) provenant de granulats naturels ou artificiels. Pour l'étude des performances de liants synthétiques avec trois granulats, de la bauxite calcinée, du quartz et des laitiers cristallisés à l'arc électrique ont été utilisés. C'est la bauxite calcinée qui a affiché les meilleures performances d'adhérence à long terme.

L'importance de la microtexture dans les bétons de ciment Portland a été régulièrement démontrée. Pour créer une microtexture, on utilise des granulats de différentes durabilités. L'usure différentielle des mélanges de granulats obtenus permet de maintenir une microtexture assurant de meilleures caractéristiques de frottement à la couche de roulement.

Construction

Pratiques et options de revêtement

La production continue sur place est de loin la technique de pose la plus courante. Les matériaux sont traités sur le chantier. Sur les chaussées bitumineuses, la circulation est autorisée dès refroidissement du revêtement. En revanche, lorsque les matériaux nécessitent des prises plus longues, la production hors site présente de nombreux avantages, notamment les suivants :

- Réduction de la longueur des ateliers de mise en œuvre.
- Construction hors de la zone de travaux, dans un milieu plus sûr et contrôlé.
- Construction plus rapide : la prise peut être réalisée sur une durée plus longue et dans des conditions optimales.
- Amélioration de l'assurance qualité et du contrôle des matériaux de chaussées. La prise peut être réalisée dans des conditions optimales (contrôle des délais, des températures, etc.). La pose de matériaux parfaitement durcis réduit le risque de dommages par fissuration due aux contraintes.
- La préfabrication réduit la plupart des risques que pourrait encourir le personnel sur le chantier. La pose étant plus rapide, le personnel sera moins exposé aux risques liés à la circulation. Enfin, un contrôle efficace en usine réduira les risques liés aux fumées sur place.

La préfabrication présente toutefois certains inconvénients. Elle peut être plus coûteuse, les sections préfabriquées peuvent nécessiter une bonne adhésion à la couche de chaussée et les raccords peuvent être complexes.

Différentes méthodes de pose sont en cours d'essai aux Pays-Bas. Les chaussées rigides sont placées sous forme de dalles et les chaussées souples sont mises en œuvre en continu.

Évaluation

Avant de sélectionner un matériau pour une couche de roulement à longue durée de vie, il faut prendre en compte un certain nombre de facteurs concernant la conception, la construction et l'entretien, et de questions liées aux usagers et à la société. Le tableau 5.6 présente un classement subjectif de différents matériaux, en fonction de certains de ces critères. Les matériaux comparés comprennent un bitume extrêmement modifié par réaction, un bitume réactif modifié, un liant synthétique, un composite bitume-ciment et un béton à hautes performances (BHP). Plus le chiffre attribué est faible, plus le niveau de qualité est élevé pour le critère concerné.

Tableau 5.6. Comparaison de différents matériaux

	Chaussées souples		Chaussées rigides		
	Bitumes modifiés par réaction	Bitumes réactifs modifiés	Liants synthétiques	Composites	Béton de poudres réactives
Conception	1	2	2	2	1
Essais	1	2	2	2	1
Production	Sur site	Sur/hors site	Chaussées site	Sur site	Hors site
Construction	112	21-32	21-32	22-32	22-32
Complexité	1	2	2	2	2
Vitesse	1		1-3		2-3
Facilité de mise en œuvre	2	2	2	2	2
Santé et sécurité	122	211	211	111	1-211
Santé du personnel	1	2	2	1	1-2
Risques d'incendie	2	1	1	1	1
Domages dus aux déversements	2	1	1	1	1
Entretien					
Facilité	1	2	2	2	2
Coût prévu	3	2	2	3	1
Critères de l'utilisateur					
Uni	1	1-3	1-3	1	1-3
Bruit	1	1-2	1-2	2	3
Adhérence	2	1	1	2	3
Projections d'eau	1	1	1	2	3
Possibilité de recyclage	Totale	Oui	Oui	Oui	Oui
Durée de vie prévue					
Années	15-25	20-30+	20-30+	15-25	40+
Coût	2	2-3	3	2	4

Remarque : plus le chiffre attribué est faible, plus la qualité est élevée.

Source : Auteur.

La facilité de conception et des essais du bitume modifié par réaction et du BHP est jugée comparable, respectivement, à celle des enrobés bitumineux actuels et du béton de ciment Portland. Les autres matériaux paraissent un peu plus difficiles à concevoir et à

tester. Le composite nécessite la conception de l'enrobé ouvert et l'optimisation des propriétés d'injection. Les bitumes réactifs modifiés et les liants synthétiques ont des relations complexes entre leurs propriétés physiques et chimiques.

La production des matériaux souples se fera plus probablement sur site. La production des matériaux souples très réticulés, tels que les bitumes réactifs modifiés et les liants synthétiques, pourra être réalisée des deux manières. La production des BHP sera effectuée obligatoirement hors site, sous forme de dalles, en raison des conditions de cure complexes.

Trois questions liées à la construction doivent être prises en compte : la complexité (climat, logistique de transport, etc.), la vitesse et la facilité de mise en œuvre. Le bitume modifié par réaction devrait être comparable en matière de complexité et de vitesse au béton bitumineux classique. Les liants réactifs modifiés et les liants synthétiques nécessiteront la pose d'une couche d'accrochage essentielle, ainsi qu'une surveillance minutieuse des conditions météorologiques et du temps de prise. La construction hors site des dalles ou des rouleaux devrait réduire la complexité et la durée des opérations. La construction du composite se fera en deux étapes : construction de l'enrobé ouvert et remplissage des pores par injection. Les conditions de prise du BHP sont plus déterminantes que celles du béton de ciment Portland. La vitesse de mise en œuvre des matériaux nécessitant de longues durées de prise devrait être améliorée par une production hors site. Tous ces matériaux seront un peu plus difficiles à mettre en œuvre que leurs homologues existants.

Les questions liées à la santé et à la sécurité ne semblent pas sensiblement différentes de celles observées dans la pratique courante. Concernant les liants époxy ou synthétiques, les opérateurs devront utiliser des masques pour mélanger les composants. Après le malaxage, les risques liés aux fumées seront minimes. Il est fait peu mention, voire aucunement, de questions de santé concernant les superplastifiants ; les mêmes précautions semblent donc être applicables au BHP. À l'exception du bitume modifié par réaction, ces matériaux ne supportent pas la combustion, et pour la plupart, sont résistants au déversement de substances acides ou basiques.

Le bitume modifié par réaction semble d'un entretien plus facile, mais aussi plus cher. Ce matériau n'est pas prévu pour être aussi durable que les autres et pourrait demander un entretien supplémentaire ou plus fréquent. La durabilité de ce composite est également inconnue et pourrait nécessiter un entretien supplémentaire. Les autres systèmes ont un temps de prise qui complique légèrement leur utilisation, en matière d'entretien.

Tous ces matériaux devraient assurer l'uni de la route, satisfaisant ainsi aux critères de l'utilisateur. Les chaussées construites hors site sous forme de dalles devront être munies de joints. Les dalles mal posées ou qui se déplaceront après la construction réduiront la qualité de l'uni. Le bruit sera un facteur important dans le cas des matériaux rigides, non poreux, en particulier pour le BHP. L'adhérence sera au début légèrement inférieure sur les systèmes modifiés par réaction et les systèmes composites, jusqu'à ce que le liant et le mortier, respectivement, commencent à s'user. En raison de son homogénéité, le BHP exigera une régénération de la surface. Les caractéristiques en matière de projections

d'eau suivront la même tendance. Elles représenteront généralement plus un problème pour les matériaux moins poreux et plus homogènes.

Tous ces matériaux devraient être plus ou moins recyclables. Le bitume modifié par réaction peut être recyclé et réutilisé sur toute la chaussée ; il a une valeur de récupération. Les autres matériaux devraient être recyclables comme le BCP ou en roche noire. Ils pourraient être utilisés en fin de vie dans les couches inférieures, la couche de base ou comme matériaux de remblai. Toutes les fines obtenues pourraient être transportées à un site d'enfouissement.

Recommandation

Le bitume époxy mérite d'être examiné en tant que matériau susceptible de faire l'objet de recherches plus poussées sur les couches de roulement à longue durée de vie. Nous disposons de nombreuses données de terrain et d'historiques de performances sur différents tabliers de ponts. Il est à noter que le bitume époxy posé sur le tablier du pont San Mateo en 1967 est toujours en bon état. Ce matériau pourrait être un candidat présentant peu de risques. En outre, son application se fait essentiellement selon des techniques déjà établies.

Les bétons à hautes performances (BHP) méritent aussi un examen. Bien que toutes les données proviennent de la recherche en laboratoire, leurs propriétés semblent tout à fait remarquables, en particulier leur résistance et leurs propriétés en flexion. Leurs inconvénients, à savoir une réduction médiocre du bruit et des projections d'eau, peuvent être résolus par une amélioration de la macrotexture. Par cette méthode, on a pu obtenir un produit comme l'Italgrip, une mince couche d'époxy sur laquelle est appliqué un granulat manufacturé durable. Les coûts devraient être nettement supérieurs à ceux des autres matériaux présentés, mais devraient diminuer lorsque la production aura atteint une vitesse de croisière. La mise au point de plastifiants moins coûteux pour les BHP devrait également faire baisser les prix. Ces matériaux sont présentés comme des produits à haut risque, mais qui pourraient être extrêmement durable, en cas de fabrication hors site et de construction sous forme de dalles. D'autres candidats potentiels pourraient s'avérer moins intéressants, en raison de la durée de vie prévue, du total des coûts sur la durée de vie et d'un historique des performances insuffisant.

Références

- Anderton G.L. (2000), *Engineering Properties of Resin Modified Pavement (RMP) for Mechanistic Design*, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Report n° ERDC/GL TR-02, États-Unis.
- Duvall D. (2003), communication personnelle.
- Gaul R.W. (1993), *Epoxy Asphalt Concrete – A Polymer Concrete with 25 Years Experience*, SP 166-13, p. 233-251, États-Unis.
- Gustafson K. (1997), *Pavement Wear from Studded Tyres – The Swedish Solution*, Technical Report ISCORD 97, 5th International Symposium on Cold Region Development, Anchorage, États-Unis.
- Jacobson T. (1997), *The Wear Resistance of Bituminous Mixes to Studded Tyres – The Swedish Experience*, Technical Report ISCORD 97, 5th International Symposium on Cold Region Development, Anchorage, Alaska.
- Jacobson T. (1999), *Beläggningsslitage från dubbade fordon*, VTI, note 44, Suède.
- Jacobson T. et Wågberg L.G. (1998), *Development of Prediction Model for Pavement Wear, Wear Profile and Annual Cost*, VTI, note 76A, Suède.
- Kosmatka S.H., B. Kerkhoff et W.C. Panarese (2002), *Dosage et contrôle des mélanges de béton*, Portland Cement Association, Engineering Bulletin 101F, 358 pp., Skokie, Illinois.
- Richard P. et M.H. Cheyrezy (1993), *Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength*, ACI Spring Convention, San Francisco, Californie.
- Saarela A. (1993), *Asphalt Pavements Design*, ASTO project, VTT, Finlande.
- Van Der Zwan J.Th., *Dienst Wegen Waterbouwkunde (Dww)*, Ministerie Van Verkeer En Waterstaat, Pays-Bas.

Chapitre 6

Conceptualisation : exigences techniques relatives à la couche de surface des chaussées à longue durée de vie et recommandations pour l'évaluation des solutions envisageables

Ce chapitre définit les grandes lignes d'un programme de recherche qui évaluerait intégralement l'aptitude à l'usage des matériaux envisageables pour les couches de roulement à longue durée de vie.

Ce chapitre est divisé en quatre parties. Du fait qu'un revêtement à longue durée de vie doit être posé sur une structure à longue durée de vie, une première section détaille les hypothèses de comportement des couches inférieures. Ensuite, sont décrites les exigences de performance pour les couches de roulement à longue durée de vie. Les modes et causes de rupture des revêtements sont exposés en détail. Ces informations permettent de déterminer les essais qui serviront à évaluer les performances des matériaux candidats pour les revêtements à longue durée de vie. La section suivantes donne une liste non exhaustive des essais disponibles (ou facilement adaptables) en laboratoire. La section finale récapitule et classe par ordre de priorité les principales conditions requises pour un programme de recherche destiné à évaluer le comportement des couches de roulement.

Contexte de l'étude

Cette étude porte sur la couche de roulement d'une chaussée, tout en reconnaissant que l'ensemble des couches joue un rôle dans le comportement d'une chaussée. À cette fin, les couches structurelles de la chaussée sont supposées être à longue durée de vie. Cette section aborde les hypothèses relatives à leur comportement. Celles-ci permettront de définir et de concevoir des méthodes d'essai capables d'évaluer les performances des matériaux candidats pour les couches de roulement à longue durée de vie.

Définition des couches structurelles et de surface

La partie structurelle (ou support) de la chaussée comprend les couches qui contribuent à la résistance en flexion des chaussées (maximum de 50 cm). Il s'agit du sol naturel, de la couche de forme, de la couche de fondation et de la couche de base (manuel LCPC-SETRA-USIRF, 1997).

La couche de surface est composée des couches supérieures. Il peut s'agir d'une couche unique (la couche de roulement) ou plus généralement d'un système composite, comprenant la couche de roulement, la couche de liaison et la couche d'accrochage située entre la couche de liaison et la partie structurelle de la chaussée. Ce rapport s'intéresse essentiellement à la couche de surface de la chaussée.

Hypothèses de comportement des couches structurelles

Une des principales hypothèses de ce projet est que les couches structurelles se comportent comme un support à longue durée de vie, au moins dans les conditions de circulation prévues. Celui-ci est supposé présenter les caractéristiques suivantes :

- Sa déformation sous la charge de trafic est totalement réversible (des déformations permanentes exigeraient un renouvellement, qui mettrait fin à la durée de vie).
- Cette réversibilité peut être de type soit élastique soit viscoélastique et peut dépendre de la température et de la vitesse du trafic. Le rapport entre la déformation et la charge peut être ou non linéaire.
- Sa surface peut être continue ou discontinue.
- Des hypothèses doivent être émises concernant les coefficients de dilatation.

Pour les supports au comportement élastique linéaire, le comportement au trafic peut être déterminé par un paramètre : la contrainte (déformation) horizontale maximale à la surface du support lors du passage d'une charge unitaire par roue ($\varepsilon_{SC\max}^o$). Ces données peuvent être obtenues en modélisant la couche d'assise à l'aide d'un modèle élastique multicouche. Elles ne peuvent être directement dérivées des mesures de déflexion et de rayon de courbure¹, habituellement prises à la surface de la chaussée.

À partir des techniques de chaussées existantes, il faut examiner trois principaux groupes de matériaux pour le support : matériaux bitumineux (chaussées souples), béton de ciment Portland (couche de roulement à longue durée de vie sur chaussée rigide) et matériaux traités aux liants hydrauliques. Dans le premier cas, la surface peut être supposée continue, sans fissuration. Dans les deux derniers cas, l'existence de joints ou de fissurations transversales et éventuellement longitudinales devra être envisagée. Il convient peut-être, en quatrième lieu, d'examiner également les ponts. Selon leur type, les chaussées de ponts peuvent présenter un comportement mécanique spécifique, en particulier la couche de roulement.

Une propriété importante des couches de chaussées (support et surface) est leur comportement thermique. Celui-ci comprend les propriétés de diffusion (coefficient d'échange thermique en surface), qui jouent un rôle important dans les profils verticaux de température. Le comportement en dilatation thermique des différentes couches peut avoir une grande incidence sur le comportement de la couche de roulement et l'adhésion avec le support. Les études ont également montré que les contraintes thermiques pouvaient être sensiblement réduites en présence de matériaux viscoélastiques. C'est

1. Le rayon de courbure R sous une charge unitaire permet de calculer le gradient de déformation à l'intérieur de la couche de roulement, si nécessaire, par exemple dans le cas d'une couche de surface composite épaisse. Ainsi, la contrainte horizontale maximale dans la couche de roulement sous la charge P et à la hauteur z au-dessus du support est donnée par : $\varepsilon_{SC\max}(z) = P(\varepsilon_{SC\max}^o + Rz)$.

pourquoi il est important de savoir si le support ou la couche de roulement a un comportement viscoélastique.

Ainsi, les recherches devront non seulement porter sur la couche de roulement, mais devront aussi déterminer sur quel type de support elle peut être appliquée.

Les sections suivantes proposent des essais à différentes échelles pour évaluer les propriétés de la couche de roulement à longue durée de vie. Certains d'entre eux devront simuler le comportement prévu du support et il conviendra de déterminer le type de support le plus approprié. Cela sera possible en construisant un support réel pour les essais en vraie grandeur. En revanche, il faudra trouver des substituts représentatifs pour les essais en laboratoire et à échelles plus réduites.

Exigences techniques et de performance pour les couches de surface

Ce paragraphe recense les exigences « technologiques » concernant les couches de surface des chaussées et les performances supérieures nécessaires pour les couches de surface des chaussées à longue durée de vie. Les principales causes de diminution des performances dans le temps sont détaillées. Les grands mécanismes de dégradation, lorsqu'ils sont connus, sont également abordés. Ces informations sont nécessaires à l'évaluation des solutions pour les couches de surface des chaussées à longue durée de vie. Les essais expérimentaux doivent être liés aux besoins déterminés et peuvent servir à reproduire la cause de la dégradation ou la nature du dysfonctionnement (et parfois les deux).

Les exigences concernant la couche de roulement et les couches structurelles sont très différentes. Ces dernières supportent la charge de trafic et la transforment en une contrainte verticale acceptable sur le sol. La couche de roulement doit assurer des conditions de conduite en toute sécurité pour l'utilisateur et la protection des couches inférieures. Pour cela, elle doit satisfaire à un certain nombre de critères qui sont abordés plus loin dans cette section :

- Faisabilité et qualité de la construction.
- Durabilité mécanique.
- Critères de performance pour l'utilisateur, tels que l'adhérence, la drainabilité et les performances acoustiques.
- Réparabilité et recyclabilité, pour des réparations périodiques ou en fin de vie (qui ne peuvent être exclues même dans le cas des couches de surface de chaussées à longue durée de vie).

Exigences de construction (maniabilité, maturation, santé, environnement)

La maniabilité des matériaux est essentielle pour la construction des chaussées. On doit pouvoir réaliser facilement des couches homogènes, d'épaisseur et de performances constantes sur de longues distances. Cette condition est encore plus importante dans le cas des couches de surface, dont l'épaisseur est relativement faible et dont les propriétés,

notamment celles intéressant l'utilisateur, doivent être les plus constantes possibles sur une même route.

Dans le cas des bétons bitumineux, la compactabilité doit être équilibrée : suffisante pour la prise du matériau, mais pas trop élevée pour éviter un orniérage ultérieur. L'homogénéité et la stabilité du mélange sont également importantes pour éviter la ségrégation des granulats de différentes grosseurs.

Certains matériaux (béton hydraulique, béton bitumineux à froid, etc.) nécessitent un temps de prise ou de maturation avant que la route ne soit ouverte à la circulation, ce qui constitue une autre contrainte dont il faut tenir compte. Bien que celle-ci ne soit pas un motif de rejet en soi, elle peut avoir une incidence sur l'application d'une méthode de construction de chaussée, selon le contexte.

Un souci majeur concernant toute nouvelle technique de chaussée est qu'elle ne porte atteinte ni aux ouvriers sur le chantier ni à l'environnement. Cet objectif est une des raisons principales du développement des techniques de béton bitumineux à froid. Ces critères s'appliquent essentiellement à la construction sur site. La situation peut être différente en cas de préfabrication des matériaux ; des sites industriels spécialisés permettront de résoudre un grand nombre des difficultés rencontrées sur site et d'introduire bien d'autres matériaux. Mais d'autres problèmes peuvent se faire jour : le stockage dans de bonnes conditions des couches de surface préfabriquées et leur pose sur site.

Ces questions de construction devront être examinées et largement développées pendant les phases d'essais ultérieures, y compris les essais en vraie grandeur.

Performances mécaniques et durabilité

Une fois construite, la couche de surface doit résister aux charges de trafic à court et long terme, aux conditions climatiques et aux autres sources d'agression. Elle doit également protéger la couche d'assise contre les dégradations (les pluies en particulier) pour assurer la durabilité de l'ensemble de la structure.

Les paragraphes suivants détaillent les principales dégradations et leurs causes auxquelles les couches de surface des chaussées devront résister. L'évaluation concernera également l'adhésion entre les différentes couches et l'adhésion avec le support.

Résistance à l'orniérage

Les couches de surface bitumineuses épaisses présentent un risque particulier à l'orniérage en raison de l'effet direct de la pression des pneus des poids lourds (autour de 8 MPa). Le phénomène est lié à la rhéologie viscoélastique des liants bitumineux (il ne se produit pas sur les liants hydrauliques). Les charges répétées induites par l'augmentation du trafic accroissent la déformation permanente des enrobés bitumineux. Le risque augmente dans les climats très chauds (la viscosité du liant diminue), les zones à circulation lente (par exemple sujettes aux encombrements), les sections à virages serrés ou les zones de freinage (la présence d'efforts de cisaillement est un facteur défavorable). L'épaisseur des couches est un paramètre important : plus celles-ci sont minces, plus le risque d'orniérage est faible.

Les couches de surface des chaussées à longue durée de vie devront être résistantes à l'orniérage, quelles que soient les conditions climatiques. La plupart des laboratoires des ponts et chaussées disposent d'appareils d'essai d'orniérage et ces essais pourraient être réalisés facilement.

Une autre cause d'orniérage peut être l'usure de la surface de la chaussée dans les traces de roues. Elle peut constituer un problème important pour les couches de surface des chaussées à longue durée de vie, notamment en cas d'utilisation de pneus à clous en hiver.

Résistance à la fissuration

La fissuration des couches de surface doit être évitée non seulement parce qu'elle dégrade la surface mais aussi parce qu'elle peut nuire à l'ensemble de la structure de la chaussée, en particulier par pénétration d'eau dans les couches inférieures. Ce phénomène provoque une érosion, un décollement des couches de la chaussée (éventuellement favorisé par les charges de trafic et par la surpression hydraulique résultante), une perte de portance et la formation de lentilles de glace à l'intérieur de la structure.

Les fissures de fatigue des couches structurelles (de bas en haut) sont dues à la répétition des efforts de traction induits par la circulation. En théorie, elles ne sont pas un problème pour les couches de surface, essentiellement soumises aux efforts de compression sous la charge de trafic. Toutefois, l'expérience montre que les couches de roulement ne sont pas à l'abri de fissurations sévères même lorsqu'elles sont posées sur des couches structurelles en bon état. Cela est dû à plusieurs causes qui n'ont pas encore été totalement identifiées à ce jour. Les causes et types de fissuration les plus importants sont détaillés ci-dessous.

Fissuration thermique

La fissuration thermique (généralement transversale) constitue un des principaux risques de fissuration des couches de surface. Les températures de gel induisent des déplacements horizontaux négatifs et/ou des efforts de traction, aggravés par leur nature cyclique. Ce phénomène est complexe et n'a pas encore été totalement compris. Il dépend des éléments suivants :

- Évolution du gradient de température dans toute l'épaisseur de la chaussée.
- Coefficients de dilatation des différentes couches.
- Structure continue ou discontinue du support (par exemple, joints longitudinaux ou transversaux).
- Rhéologie des matériaux, en particulier s'il s'agit de matériaux viscoélastiques très thermosensibles, comme l'enrobé bitumineux (Faure *et al.*, 1999).
- Résistance à la traction des matériaux, éventuellement thermosensibles, en fonction de l'historique thermique des matériaux (fatigue thermique sous l'effet de cycles de température quotidiens et annuels).

En règle générale, plus le matériau est dur, plus le risque de fissuration thermique est important. La fissuration thermique est un problème majeur dans les chaussées en béton de ciment Portland (BCP). Elle est atténuée par les joints transversaux ou les armatures en acier continu par exemple (BAC). Le risque peut être limité dans les chaussées bitumineuses par un choix approprié de la dureté du bitume, en fonction des conditions climatiques locales. Il convient de trouver un compromis entre la prévention de la fissuration thermique à basse température et de l'orniérage à température élevée. Quant aux matériaux bitumineux, plus ils sont soumis à une large gamme de températures climatiques, plus leur formulation est difficile.

L'étude de la fissuration thermique dans des conditions de laboratoire est une tâche complexe et de longue haleine, en particulier si elle inclut les effets de la fatigue thermique (qui nécessiterait la simulation de nombreux cycles thermiques). L'extrapolation de tels résultats au comportement sur site des matériaux de chaussées est risquée car la dégradation est due à l'association des conditions climatiques et de la charge de trafic. Une évaluation devra s'appuyer sur une étude bibliographique de toutes les informations qualitatives et quantitatives, acquises par l'expérience. Les essais en laboratoire porteront essentiellement sur le comportement thermique des matériaux : coefficients de dilatation (à comparer avec ceux du support), rhéologie (élastique ou viscoélastique, susceptibilité thermique) et conductivité thermique.

Remontée de la fissuration

La remontée de la fissuration constitue une autre cause importante de dégradation des couches de surface. Elle se caractérise par des fissures de la couche de surface, provenant généralement de discontinuités transversales de l'assise. Elle est typique des chaussées semi-rigides avec une mince assise en béton. Elle est essentiellement due à des charges répétées du trafic mais, comme on l'a déjà souligné, des conditions de basse température peuvent également avoir un effet négatif par aggravation des discontinuités du support, induisant des efforts de traction et réduisant le transfert de charge.

Une évaluation des couches de surface ne peut ignorer totalement les performances du support et l'adhésion avec la structure. Les supports discontinus sont *a priori* à rejeter pour les couches de surface des chaussées à longue durée de vie en raison de leur mauvais état. En revanche, le comportement des couches de roulement à longue durée de vie en cas de fissuration du support doit être étudié car cet état ne peut pas toujours constituer un motif de rejet. On décrit plus loin un dispositif élaboré pour étudier le comportement de chaussées semi-rigides et plus spécialement la prévention des fissures réfléchies.

Fissuration de haut en bas

Des fissures de haut en bas ont été couramment observées ; ce sont généralement des fissures longitudinales survenant à la surface des chaussées dans les traces de roues des véhicules. Elles diffèrent des fissures thermiques ou réfléchies et plusieurs explications ont été avancées pour décrire ce phénomène qui n'a pas encore été totalement compris.

Cette fissuration est peut-être due à la répartition hétérogène de la pression exercée par les pneus sur la chaussée (De Beer *et al.*, 2002). Cela ne peut expliquer la propagation

de fissures de plusieurs centimètres au-dessous de la surface de la chaussée. Cependant, le gradient thermique dans la couche de surface pourrait aussi avoir un effet. Une autre explication possible réside dans les importants efforts de traction horizontaux qui peuvent apparaître à la surface de la chaussée après le passage des véhicules, en raison du comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux (Tamagny *et al.*, 2004). Quelle que soit l'explication, le risque d'une dégradation de ce type devra être pris en compte dans l'étude des matériaux envisageables pour les couches de surface des chaussées à longue durée de vie.

Décollement

Le décollement entre les couches qui adhèrent initialement les unes aux autres est un mode de dégradation éventuel important dans les structures multicouches. Le risque peut se situer entre le support et la couche de surface des chaussées à longue durée de vie (en supposant que la surface adhère de manière continue au support) ou entre la couche de liaison et la couche de roulement dans le cas d'une surface composite à deux couches.

La cause principale est la circulation, qui peut induire un décollement selon les modes I, II ou III². Des variations de température en profondeur et dans le temps, ainsi que la pénétration d'eau (ou la condensation d'eau) entre les couches, peuvent aggraver le mécanisme.

Vieillessement

Un grand nombre de matériaux sont susceptibles de vieillir, leur composition chimique évoluant dans le temps, par oxydation essentiellement. Ce phénomène entraîne des modifications de leurs propriétés physiques, généralement peu favorables à la durabilité de la structure.

Tel est généralement le cas des matériaux bitumineux (bitume pur, mais aussi bitumes modifiés aux polymères). Ces matériaux deviennent de plus en plus rigides avec le temps et perdent certaines de leurs propriétés positives telles que la relaxation des contraintes ou l'auto-régénération. À mesure qu'ils deviennent plus faibles, les risques de fissuration (toutes causes confondues), de décollement et d'arrachement augmentent (guide AIPCR-LCPC, 1999).

Des conditions d'été très chaud accélèrent considérablement l'oxydation³. On pense aussi que le rayonnement ultraviolet peut jouer un rôle. Cet effet est donc surtout un problème pour les couches de surface plus directement exposées à l'oxygène et au rayonnement ultraviolet.

Des essais de résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air (RTFOT) ont été développés en laboratoire pour évaluer cet effet sur les matériaux bitumineux à

2. Il s'agit de la terminologie classique relative aux différents modes de propagation des fissures.

3. De nombreuses réactions chimiques répondent à des lois cinétiques de type Arrhenius, $\dot{\alpha} = Ae^{-k/RT}$, extrêmement sensibles à la température Kelvin T .

court terme. Des études de cas de matériaux traditionnels ont permis de déterminer les relations existantes entre le vieillissement RTFOT et le vieillissement sur site.

Le vieillissement sera une question importante pour les couches de surface des chaussées à longue durée de vie, qui par définition doivent être particulièrement durables.

Exigences spécifiques pour la couche de roulement

La couche de roulement doit satisfaire à un ensemble d'exigences spécifiques liées à son utilisation fonctionnelle. Cette section décrit brièvement les performances requises pour supporter un trafic en toute sécurité.

Nécessité d'une texture durable et à hautes performances

L'adhérence est l'exigence la plus importante pour l'utilisateur, notamment dans des conditions humides. Pour les couches bitumineuses ou en béton classiques, l'adhérence est assurée essentiellement par la composition granulaire (courbe granulométrique) des matériaux et par les propriétés des particules elles-mêmes. Ces deux facteurs créent des irrégularités à différentes échelles (du micromètre au centimètre ou décimètre) sur la surface de la route, permettant une adhérence et un drainage sur la zone de contact pneu/chaussée. Pour les dalles en béton de ciment Portland, des rainures sont ajoutées au cours de la construction pour donner des « irrégularités » supplémentaires améliorant à la fois le drainage et l'adhérence (Martinez, 1977).

La géométrie complexe de la couche de roulement définit sa texture : la microtexture se situe à l'échelle des irrégularités de surface des granulats et la macrostructure à l'échelle du mélange. Une macrotexture élevée est nécessaire pour créer des canaux d'évacuation de l'eau présente entre le pneu du véhicule et la surface de la route. Une microtexture élevée est nécessaire pour que le pneu pénètre dans la mince pellicule d'eau et réalise un contact sec avec la route. L'adhérence doit être maintenue sur toute la durée de vie d'une couche de roulement, quel que soit la charge supportée (trafic et climat).

Les exigences relatives aux propriétés initiales d'utilisation sont bien connues pour les matériaux de couches de roulement classiques. L'évolution et la durabilité de ces propriétés en fonction de l'environnement routier (trafic et climat) sont également assez bien connues pour ces matériaux.

Trouver des matériaux avec des propriétés d'utilisation à long terme sera une des principales tâches dans le développement de couches de roulement à longue durée de vie. Trouver des essais et des protocoles appropriés pour établir la durabilité de tels matériaux sera difficile, non seulement parce que les essais devront être accélérés, mais aussi parce que les causes et les mécanismes de dégradation sont nombreux et complexes. Les principaux défauts observés sur le terrain sont l'arrachement, le désenrobage, l'érosion, le polissage et la perte d'adhérence.

L'arrachement et l'érosion sont des détériorations progressives d'une macrotexture en béton bitumineux avec perte d'adhésivité entre le granulat et le liant bitumineux. En conséquence, la surface de la couche de roulement perd des particules de granulat (arrachement) et de liant bitumineux (érosion). Ce phénomène est dû à l'association de plusieurs causes :

- Importance du trafic, notamment en présence d'efforts tangentiels (zones de décélération, carrefours giratoires).
- Chute de pluie.
- Vieillessement et durcissement du liant bitumineux.
- Utilisation de pneus cloutés (Torbjörn, 1993).
- Déversement de produits chimiques.

Les couches de roulement à teneur élevée en vides (comme les enrobés drainants) sont plus sensibles à l'arrachement en raison d'une plus faible cohésion du granulat, d'une exposition plus grande aux pluies et de l'accélération du processus de vieillissement.

Le *polissage* est l'usure et la perte de microtexture du granulat (angularité, irrégularités de surface) dans les traces de roues, en raison d'une abrasion par les pneus à long terme. Les matériaux dans les traces de roues usées ont un aspect très lisse, voire brillant. Dans des cas extrêmes, cette abrasion peut provoquer des ornières. Le frottement superficiel est considérablement réduit et le risque d'accidents augmenté en raison de la perte d'adhérence. La sélection de granulats appropriés, présentant une résistance particulièrement élevée au polissage, est d'une importance primordiale dans la formulation des matériaux de couches de roulement. Des essais spécifiques ont été mis au point pour évaluer ce type de performances (Delalande, 1992).

En général, les granulats de roches naturelles actuellement utilisés dans les couches de roulement ne sont pas suffisamment résistants au polissage pour les couches de surface des chaussées à longue durée de vie (au moins sur les routes à forte circulation). Les granulats des revêtements à longue durée de vie devraient présenter des performances très élevées à long terme et proviendraient vraisemblablement de sources « artificielles ». En cas contraire, la texture superficielle (micro et macro) pourrait être créée par d'autres moyens.

Amélioration du drainage

Le drainage superficiel est essentiel pour préserver l'adhérence en conditions humides et protéger la couche d'assise. La surface transversale de la chaussée devrait être conçue pour permettre une évacuation rapide des eaux en cas de fortes pluies. Il est également important de réduire les projections d'eau en conditions humides, notamment sur les routes à forte circulation supportant de nombreux poids lourds. Le dimensionnement des chaussées à longue durée de vie devra répondre à ces exigences et assurer le maintien des performances sur toute la durée de vie de la chaussée.

Propriétés acoustiques

La réduction du bruit routier est un des objectifs les plus importants des gestionnaires des routes dans les pays développés, en particulier sur les routes à forte circulation en zone urbaine. Ces routes constituant les sites les plus probables pour les chaussées à longue durée de vie, elles devront répondre à des normes strictes en matière de réduction du bruit. Les performances acoustiques des couches de roulement à longue durée de vie

devront donc être établies. D'autres méthodes de réduction du bruit routier sont possibles (murs antibruit, résonateurs de Helmholtz). Toutefois, de nombreux gestionnaires ont une préférence marquée pour les revêtements de chaussées peu bruyantes (comme le montre la baisse d'utilisation des couches de roulement en béton de ciment Portland pour cette raison).

Autres propriétés requises pour les chaussées à longue durée de vie

Il faudra développer un certain nombre d'autres propriétés pour réduire l'entretien périodique. Par exemple, les marquages routiers devront être aussi durables que les couches de surface. Les panneaux, équipements et dépendances vertes devront être conçus de façon que l'entretien courant et le nettoyage puissent être effectués sans perturber le trafic.

Réparation, entretien, recyclage

Finalement, bien que les chaussées à longue durée de vie ne doivent théoriquement pas nécessiter d'entretien pendant des périodes très longues, la réparation et le remplacement des couches de surface de chaussées à longue durée de vie devront être aisés. Des événements imprévus (séismes, incendies) pourraient nécessiter des réparations rapides et efficaces, pour restaurer la longévité de la chaussée. Il est bien connu, par exemple, que l'absence de méthodes de réparation simples et rapides pour les chaussées rigides constitue un obstacle majeur à l'accroissement de leur utilisation dans certains pays.

En définitive, les chaussées à longue durée de vie ne devront pas causer de problèmes aux générations futures. Il faudra également prendre en compte dans la recherche le recyclage en fin de vie et la mise au rebut, ainsi que tous les problèmes afférents.

Évaluation expérimentale des techniques potentielles pour les couches de surface des chaussées à longue durée de vie

À l'heure actuelle, il n'existe aucune méthode généralement validée pour évaluer les propriétés des couches de surface. Cette section décrira les essais permettant d'évaluer au mieux les solutions envisageables et présentera quelques recommandations pour élaborer un programme totalement expérimental en phase II de cette étude.

Considérations générales sur la définition de la campagne expérimentale

Contexte d'utilisation

Ce rapport a défini les conditions générales dans lesquelles les chaussées à longue durée de vie pourraient être viables, c'est-à-dire sur les routes à forte circulation en zone urbaine ou interurbaine. La première étape de la phase II consistera à définir les paramètres numériques à explorer, tels que l'intensité des charges (verticales mais également transversales, en cas de courbes ou de pentes), le type de support, les températures (y compris le gel) et les conditions d'humidité superficielle. Ces paramètres devront prendre en compte les différentes charges par essieu autorisées dans les pays

participants, les types de structures de chaussées en service et de dimensionnements, y compris les pentes et les courbes.

Connaissances disponibles et lacunes

Une autre tâche clé consistera à collecter toutes les informations déjà disponibles sur les couches de surface envisageables pour les chaussées à longue durée de vie. Ce travail a été amorcé au chapitre 5, mais il pourrait être nécessaire de collaborer avec les maîtres d'ouvrage pour définir avec précision les conditions d'utilisation et le comportement des matériaux, les difficultés rencontrées et les lacunes dans la connaissance.

Évaluation ou développement

Les essais dépendront de l'étendue des connaissances acquises sur les performances des nouveaux matériaux. Un grand nombre d'essais décrits dans ce chapitre visent à évaluer les performances des matériaux envisageables et à déterminer leur utilité pour les revêtements de chaussées à longue durée de vie. Des recherches pourront également être effectuées pour optimiser les matériaux présentant des propriétés de durabilité éprouvées. Ces études devront porter davantage sur les travaux de développement, par exemple pour réduire le bruit et les projections d'eau ou pour garantir la viabilité des chaussées sur différents supports.

Définition du niveau de performance requis

La plupart des essais abordés ici n'ont qu'un lien indirect avec les performances réelles de la structure. C'est pourquoi les critères de performance devront être établis à l'aide de comparaisons avec les matériaux de chaussées actuels. Les matériaux à longue durée de vie devront avoir un meilleur comportement que les solutions traditionnelles. Dans la plupart des cas, il devrait être possible de corrélérer davantage les résultats des essais et la durée de vie.

Il est à noter que pour les essais répétés, on pourrait exiger un niveau de performances supérieur pour le nombre habituel de chargements répétés ou un niveau de performances égal pour un plus grand nombre de chargements.

Différents moyens d'essais utilisés dans le domaine des chaussées

De nombreux essais ont été développés dans le domaine des chaussées pour évaluer la qualité des « matériaux ». Ils vont des essais à petite échelle (moins chers), qui peuvent être réalisés en laboratoire, aux simulations en vraie grandeur, qui sont coûteuses et longues. Les paragraphes suivants décrivent les groupes d'essais recensés dans cette étude :

- Essais sur les matériaux eux-mêmes (à l'échelle du laboratoire).
- Essais sur les composants des matériaux (à l'échelle du laboratoire).
- Essais de simulation du trafic à petite échelle, à l'aide d'une petite installation de chargement accéléré (accelerated loading facility – ALF).

- Essais en vraie grandeur sur des chaussées réelles et sur des sites réels ou des sites ALF.

La phase II du projet s'intéressera aux essais et au développement en laboratoire. Si le succès des techniques est établi, des essais en vraie grandeur pourront être réalisés au cours de la phase III.

Essais à l'échelle du laboratoire sur les matériaux des couches de surface de chaussées à longue durée de vie

Évaluation des propriétés volumétriques

Le tableau 6.1 recense les principales caractéristiques qu'il convient de mesurer et les essais classiques utilisés pour mesurer ces propriétés.

En mécanique des chaussées, la réaction des matériaux aux petites déformations est très importante. Les propriétés élastiques, viscoélastiques et thermoviscoélastiques donnent des informations utiles sur le risque de dégradation. Elles peuvent être utilisées en particulier pour évaluer les risques de fissuration thermique à basse température et le risque de déformation permanente à température élevée, étant donné d'une part que la viscoélasticité contribue à la détente des contraintes thermiques, mais qu'elle augmente d'autre part le risque d'orniérage.

Les orniéreurs sont généralement utilisés pour déterminer la résistance des enrobés bitumineux à la déformation permanente (figure 6.1). Ils devraient permettre d'évaluer les couches de surface à longue durée de vie candidates qui peuvent être sensibles à la déformation permanente. Cela peut être le cas si le matériau contient un liant viscoélastique (à la température d'utilisation) et s'il est censé présenter une rigidité significative dans la chaussée (soit > 4 cm). Ces essais ne seraient pas pertinents pour les mélanges avec liant résine époxy en mince couche ni pour les mélanges à base de ciment Portland.

Tableau 6.1. Caractéristiques des chaussées et essais

Caractéristiques à mesurer	Moyens d'essai
Résilience des matériaux dans la gamme de déformations induites par le trafic (à différentes températures) ou par les variations thermiques : priorité n° 1, en l'absence de connaissances déjà disponibles	Cycles de charge/décharge Dispositifs possibles : presse, appareil de détermination du module complexe Nottingham Asphalt Tester (compression diamétrale pour rhéologie viscoélastique), essai triaxial, contrôle de température
Risque de déformations permanentes (à température élevée)	Orniéurs ; essais triaxiaux à chargements répétés à l'aide d'un capteur de contrôle de la température ; essais axiaux à chargements répétés à vide ; essais d'orniérage dû aux traces de roues
Risque de fatigue	Chargement de traction et/ou de compression répété sous presse et en mode de flexion ou uniaxial ; chargement répété de traction indirecte
Résistance à la rupture par traction (à différentes températures)	Essai de traction uniaxial ; essai de traction indirecte (essai brésilien ou module de rigidité en traction indirecte)
Résistance aux déformations thermiques en traction	Essais de déformation sous contrainte thermique ; essai de flambage et de délamination
Variations de déformations avec la température	Mesure des coefficients thermiques de dilatation
Vieillessement et sensibilité à l'eau	Utilisation de caissons thermodynamiques à différentes températures et pressions, avec gaz oxygène, humidité élevée ou autre et exposition aux rayons ultraviolets (essai de rigidité en traction du bitume saturé, Royaume-Uni)

Figure 6.1. Orniéurs circulaires

A: Diamètre 4m



Source: Shell, Delft.

B: Diamètre 5.25 m



Source: VTI, Sweden.

En théorie, les surfaces des chaussées ne sont pas sujettes aux fissures de fatigue puisqu'elles sont essentiellement soumises à des charges de compression. Néanmoins, la fissuration de haut en bas est bien documentée ; ses causes ne sont pas encore totalement comprises. C'est pourquoi il convient d'effectuer des essais de fatigue sur les couches de surface des chaussées à longue durée de vie et de comparer leurs résultats aux performances des matériaux actuellement utilisés.

Les coefficients de dilatation des matériaux sont des informations très utiles et doivent être comparés à ceux des matériaux adjacents. Si la différence est importante et que le matériau de surface est élastique, il existe alors un risque de fissuration, de délamination, de tuilage ou de gauchissement de la surface de la chaussée. Ce risque est accru à températures basses et élevées. Ce type d'essais est donc vivement recommandé, en particulier pour les matériaux élastiques et lorsque aucune information n'est encore disponible.

L'essai précédent peut être étendu pour mesurer la résistance à la rupture par traction. Cela peut être réalisé par un essai de résistance à la traction directe ou un essai de résistance à la traction indirecte, tel que l'essai brésilien. La résistance maximale à la traction due au retrait thermique peut ensuite être comparée à la résistance du matériau. Cela permet d'établir la gamme des températures auxquelles la surface peut être utilisée sans présenter de défauts.

Les essais de retrait thermique sur des échantillons de barres avec un déplacement nul aux deux extrémités établissent les conditions dans lesquelles se produira une fissuration thermique. Ils enregistrent la déformation thermique par rapport à la température jusqu'à la rupture de l'échantillon. Ce type d'essais est particulièrement utile pour les matériaux thermoviscoélastiques, sur lesquels les changements de température induisent à la fois des déformations thermiques et une modification des propriétés de fluage.

Les essais de vieillissement volumétrique seront particulièrement importants pour les candidats aux couches de surface de chaussées à longue durée de vie. L'essai de vieillissement au caisson sous pression (PAV) est un essai bien établi pour les matériaux bitumineux dans lesquels les échantillons de mélanges sont soumis à la pression du gaz oxygène et à une température élevée pendant une certaine durée. L'essai est connu pour accélérer le vieillissement des enrobés bitumineux et une certaine corrélation a été établie entre la durée de l'essai PAV et le vieillissement réel des chaussées. L'effet du vieillissement est évalué par l'évolution de certaines propriétés mécaniques (telles que la rigidité, la courbe de fluage, la résistance maximale à la traction). Les essais ont été développés pour les matériaux bitumineux. Une adaptation des procédures sera donc probablement nécessaire pour les solutions à longue durée de vie, en fonction de la composition chimique du mélange et des réactions chimiques probables.

Essais sur les propriétés de surface

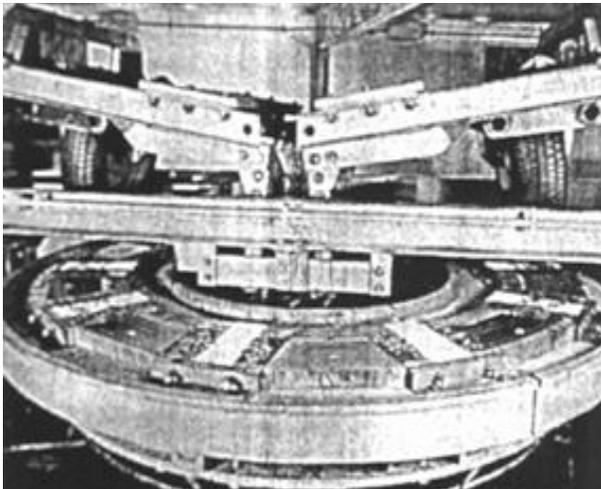
Le tableau 6.2 recense les principales caractéristiques d'usure superficielle par ordre de priorité et les essais expérimentaux permettant de mesurer leur durabilité.

Pour simuler l'usure due au trafic, on peut utiliser des orniéyeurs (figure 6.1). Certains de ces appareils peuvent appliquer des forces tangentielles au contact roue/chaussée (Jolivet, 1999 ; Nicholls, 1997).

Tableau 6.2. Caractéristiques d'usure superficielle et essais

Caractéristiques à mesurer	Moyens d'essais
Risques de délamination avec le support	Essais de délamination à chargements répétés, p. ex. essai sur une poutre bicouche (couche candidate + support) en mode de flexion
Risques d'arrachement, de désenrobage, d'usure et de perte d'adhérence	Manèges de petit diamètre pour tester l'usure (figure 6.2) Utilisation ou développement d'essais tribologiques localisés à chargement tangentiel alternatif (figure 6.3) Mesure de l'adhérence par l'essai au pendule
Résistance au déversement de produits chimiques	Essais de déversement des principaux produits chimiques (pétrole, carburants, sels de déverglaçage)

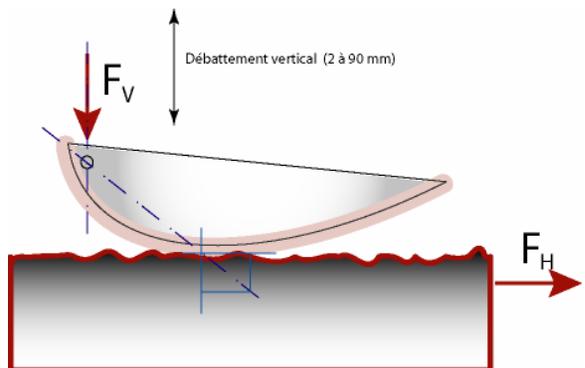
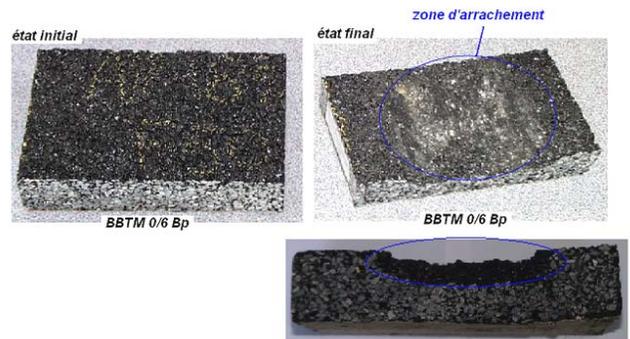
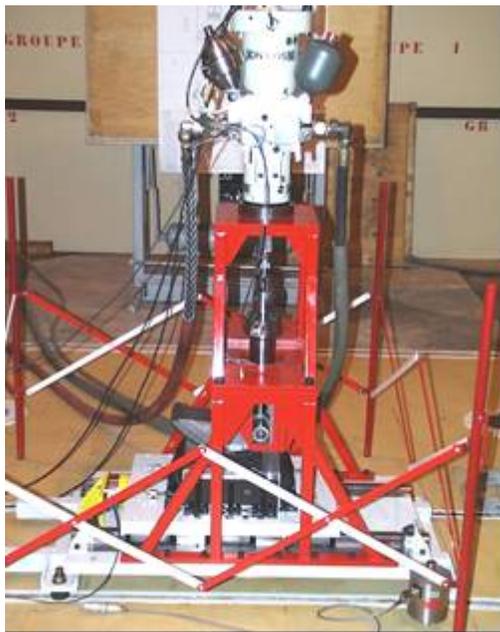
L'équipement pour mesurer les propriétés tribologiques des matériaux est actuellement en cours de développement (figure 6.3). Ces essais étudient l'usure apparaissant à la surface des matériaux et pourraient être utiles pour déterminer la durabilité des matériaux candidats.

Figure 6.2. Manège pour tester l'usure**Caractéristiques**

- Plateau circulaire de 2.10 m de diamètre
- 6 spécimens à tester simultanément
- Deux pneus 195/70 VR 14
- Chargement vertical 5 000 ± 200 N
- Température d'essai 10 ± 2°C

Source : TRL, Royaume-Uni

Figure 6.3. Dispositif expérimental pour mesurer les propriétés tribologiques des matériaux de couches de roulement



Dispositif expérimental développé au LCPC pour étudier les propriétés tribologiques des matériaux de couches de roulement.

Source : LCPC.

En haut : exemples d'usure obtenue sur des enrobés bitumineux.
En bas : échantillon et principe de chargement vertical et tangential alternatif.

Essais à l'échelle des composants

Il existe des essais portant sur les propriétés des composants de base des mélanges pour chaussées et sur leurs interactions. Ainsi, pour les enrobés bitumineux, de nombreux essais ont été mis au point concernant le bitume lui-même, le liant (fines d'apport + bitume), le mastic (fines d'apport + sable + bitume), les granulats ou l'interaction (adhésion) entre les granulats et le liant ou le mastic.

Il existe peu de relations quantitatives évidentes entre les propriétés des matériaux de base et les propriétés du mélange. Néanmoins, de nombreuses relations statistiques ont été développées à l'échelle du composant et du mélange permettant une meilleure compréhension du comportement des mélanges et l'élaboration de recommandations pour améliorer les matériaux de chaussées. Ainsi, de nombreuses spécifications (normalisées) ont été émises pour les liants et les granulats qui assurent la qualité du mélange final, si les bonnes règles de formulation sont appliquées.

Une telle approche sera très utile pour évaluer les propriétés des matériaux candidats pour couches de surface de chaussées à longue durée de vie. Prenant l'exemple d'un mélange résine époxy, on peut envisager trois applications :

- Étude (et optimisation éventuellement) de la rhéologie et du vieillissement de la résine époxy.
- Recherche de granulats à haute spécification pour assurer une adhérence de longue durée.
- Optimisation des propriétés adhésives entre la résine et les granulats.

Essais de simulation à petite échelle

Il existe un certain nombre de dispositifs d'essai à l'échelle du laboratoire qui peuvent plus ou moins simuler l'effet du trafic sur les couches de surface, en utilisant des roues à chargement vertical circulant sur des dalles de chaussée. Les orniéurs, qui servent traditionnellement à évaluer la résistance des enrobés bitumineux à la déformation permanente, pourraient être utilisés à cette fin (figure 6.1). Les procédures expérimentales devraient être adaptées pour simuler la réaction réelle des chaussées. Cela signifie que les dalles expérimentales devraient être préparées pour reproduire non seulement les couches de surface des chaussées à longue durée de vie, mais aussi les couches d'assise. En raison de la faible épaisseur de l'échantillon utilisé, il faudrait trouver un substitut pour les couches d'assise, présentant globalement un comportement équivalent (rigidité et éventuellement petites déformations permanentes). Certaines conditions climatiques pourraient être simulées dans ces essais, telles que les changements de température et la pluie. Cependant, le coût de simulation de conditions extrêmes (comme le gel) serait vraisemblablement prohibitif.

De plus, certaines de ces machines d'essai peuvent appliquer des forces tangentielles au contact entre la roue (qui peut être déviée) et la dalle expérimentale, afin d'évaluer la résistance de la couche de surface à l'usure, au désenrobage ou à l'arrachement (figure 6.2).

Essais en vraie grandeur

Les essais en vraie grandeur donnent des informations très utiles concernant le comportement des structures de chaussées sous l'effet du trafic et éventuellement d'autres types de charge. Ils peuvent indiquer comment les chaussées réagissent au passage d'un véhicule, mais aussi dans le temps au trafic et aux conditions climatiques. Les principaux modes de dégradation dans le temps peuvent ainsi être identifiés et les principales améliorations nécessaires sont mises en évidence. Les essais permettent en outre une compréhension de la construction et de la mise en œuvre du matériau, ainsi que des difficultés possibles. Dans la pratique, deux essais en vraie grandeur sont utilisés. Dans ceux de la première catégorie, une section expérimentale est placée sur une route ouverte à la circulation et contiguë au reste de la chaussée. Des données peuvent être collectées sur le trafic, l'historique climatique, la caractérisation des déformations et des contraintes. Sur de longues périodes d'observation, les informations recueillies peuvent être très utiles. La section expérimentale pourrait être sous-dimensionnée pour les conditions de circulation réelles afin d'accélérer les dommages (de la manière la plus réaliste possible) et de pouvoir les étudier. Ce type d'essai est uniquement prévu pour la phase III du présent projet.

Figure 6.4. Deux types d'installation de chargement accéléré

Manège de fatigue circulaire (diamètre : 20 m)



Source : LCPC, France

Machine de fatigue linéaire (longueur : 2 m)



Source : TRL, Royaume-Uni

Dans les essais en vraie grandeur de la seconde catégorie, on recourt à des installations de chargement accéléré, utilisées dans de nombreux pays de l'OCDE (figure 6.4). Ces installations simulent les conditions accélérées de trafic et, de ce point de vue, peuvent donner une idée précoce des performances des chaussées dans le temps. Toutefois, il n'est généralement pas possible sur ce type d'installation d'accélérer les cycles climatiques et le vieillissement du matériau. En outre, le nombre de paramètres qui peuvent être étudiés reste limité. Il convient donc de préparer avec soin ces essais, qui doivent avoir des objectifs bien définis. Selon le type d'installation et les dimensions des sections, les coûts et la complexité des essais peuvent varier sensiblement. La figure 6.4 présente deux types d'installation très différents : une piste circulaire de 120 m qui permet de tester différentes structures en même temps, et une piste linéaire qui permet de tester une longueur de 2 mètres uniquement.

Recommandations pour la phase II du programme de recherche

Le chapitre 5 recommandait d'approfondir les recherches sur la couche de roulement en bitume époxy et les chaussées en béton à hautes performances (BHP). Ces matériaux et procédés sont à différents stades de développement. Alors que les bitumes époxy sont déjà en service sur les tabliers de pont, les informations sur les BHP se limitent aux données de laboratoire. Les étapes suivantes devront être effectuées pendant la phase II :

Étape 1 : Identifier toutes les données disponibles sur les performances des échantillons de matériaux et les procédés.

Étape 2 : Identifier les « inconnues » en matière de performances qu'il faudra tester.

Étape 3 : Identifier les performances insuffisantes qu'il faudra améliorer.

Étape 4 : Identifier les essais de laboratoire qui peuvent être réalisés dans les laboratoires participants. Une liste récapitulative des essais décrits dans ce chapitre figure au tableau 6.3. Il peut exister d'autres essais réalisables dont il n'a pas été fait mention ici.

Étape 5 : Établir un programme d'essais. Il devra comprendre :

- Les essais d'évaluation pour identifier les inconnues en matière de performances.
- Le programme de développement pour améliorer les performances insuffisantes.

Étape 6 : Évaluer les résultats tirés du programme d'essais. D'autres faiblesses peuvent être identifiées qui nécessiteront un nouveau programme de développement.

Tableau 6.3. Récapitulatif des essais de laboratoire

Caractéristiques à mesurer	Moyens d'essai
Résilience des matériaux dans la gamme des déformations induites par le trafic ou par les variations thermiques (à différentes températures); priorité n° 1, en l'absence de connaissances déjà disponibles	Cycles de charge/décharge à l'aide d'une machine de compression pour la mesure du module complexe (rhéologie viscoélastique); essai de traction indirecte (essai brésilien ou module de rigidité en traction indirecte); essai triaxial; contrôle de température
Risque de déformations permanentes (à température élevée)	Orniéurs; essais triaxiaux à chargements répétés à l'aide d'un capteur de contrôle de la température; essais axiaux à chargements répétés à vide; essais d'orniérage dû aux traces de roues
Risque de fatigue	Chargement de traction et/ou de compression répété sous presse et en mode de flexion ou uniaxial; chargement répété de traction indirecte
Résistance aux déformations en traction (à différentes températures)	Essai de traction uniaxial; essai de traction indirecte
Résistance aux déformations thermiques	Essais de déformation sous contrainte thermique; essai de flambage et de délamination
Variations de déformations avec la température	Mesure du coefficient de dilatation thermique
Vieillessement et sensibilité à l'eau	Utilisation d'autoclaves à différentes températures et pressions, avec gaz oxygène, humidité élevée ou autre et exposition aux rayons ultraviolets (essai de rigidité en traction du bitume saturé, Royaume-Uni)
Risques de délamination avec le support	Essais de délamination à chargements répétés, p. ex. essai sur une poutre bicouche (couche candidate + support) en mode de flexion
Risques d'arrachement, de désenrobage, d'usure et de perte d'adhérence	Manèges de petit diamètre pour tester l'usure (figure 6.2) Utilisation ou développement d'essais tribologiques localisés à chargement tangentiel alternatif (figure 6.3) Mesure de l'adhérence par l'essai au pendule
Résistance au déversement de produits chimiques	Essai de déversement des principaux produits chimiques (pétrole, carburants, sels de déverglaçage)
Rhéologie des matériaux	
Adhérence des granulats à haute spécification	
Optimisation des propriétés adhésives entre la résine et les granulats	

Références

- AIPCR-LCPC (1999), Guide technique *Emploi des liants bitumineux modifiés, des bitumes spéciaux et des bitumes avec additifs en techniques routières*, rapport préparé par un groupe de travail, le Comité technique 8 des routes souples, 204 pp., France.
- De Beer, M., C. Fisher et F.J. Jooste (2002), *Évaluation of non-uniform tyre contact stresses on thin asphalt pavements*, 9^e Conférence internationale sur les chaussées souples, 19-22 août, Copenhague.
- Delalande, G. (1992), *Résistance des granulats au polissage, méthode par projection*, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 177, p. 73-80, France.
- Faure, M., A. Maia, L. Achimastos, J.L. Gourdon, J.F. Corte, Y. Marciano et J.M. Piau (1999), *Low-temperature Behaviour of Hard Bitumens: Experiments and Modelling*, AAPT Congress, 8-10 mars, Chicago, Illinois.
- Jolivet, Y. et M. Malot (1999), « Évaluation de la résistance aux efforts tangentiels des enrobés drainants et bétons bitumineux très minces sur le manège Total », *Revue générale des Routes et des Aérodrômes*, n° 770, p. 46-50, France.
- LCPC-SETRA-USIRF (1997), Guide technique *French Manual Design for Pavement Structures*, 248 pp., France.
- Martinez, J.E. (1977), *Effects of Pavement Grooving on Friction, Braking and Vehicle Control*, Transportation Research Record n° 633, p. 8-13, États-Unis.
- Nicholls, J.C. (1997), *Laboratory Tests on High-friction Surfaces for Highways*, TRL Report n° 176, 36 pp., Royaume-Uni.
- Tamagny, P., L. Wendling et J.M. Piau (2004), *Cracks in Pavement*, RILEM Conference, Limoges.
- Torbjörn, J. (1993), *Wear Resistance of Bituminous Mixes to Studded Tyres – A Novel Approach to Field Measurements and Correlation with VTI's Traffic Simulator*, 5th Eurobitume Congress, 4.33, p. 857-861, Stockholm.

Chapitre 7

Résumé et conclusions

Ce chapitre résume les résultats de la première phase du projet et tire des conclusions en ce qui concerne la phase II.

Le champ de la phase I du présent projet comprend l'examen du revêtement des chaussées pour routes principales supportant un volume de trafic élevé avec une proportion significative de poids lourds. Ces routes sont supposées présenter une résistance structurelle importante et seraient désignées, dans la terminologie récente, sous le nom de chaussées à longue durée de vie ou chaussées perpétuelles. Certains aspects des routes à longue durée de vie étant actuellement étudiés par d'autres groupes internationaux, ce rapport a été consacré à l'examen des couches de roulement à hautes performances. La couche de roulement d'une route doit avoir de nombreuses qualités, dont la résistance au vieillissement, à l'humidité et à la fatigue thermique, ainsi que des propriétés de frottement et de drainage. À ce jour, le projet a étudié les propriétés des matériaux qui seraient nécessaires pour un revêtement à longue durée de vie, ainsi que les aspects économiques, afin de déterminer les critères de rentabilité en termes de coût et d'espérance de vie. Cette étude, constituant la première des trois phases du projet, porte sur quatre domaines :

- Matériaux existants : modalités d'utilisation et identification des politiques d'entretien adoptées par les administrations routières.
- Nouveaux matériaux susceptibles de contenir de nouveaux liants : caractéristiques de performances et indications de coûts.
- Considérations économiques et critères de rentabilité à long terme des matériaux coûteux.
- Examen des critères de performances techniques pour les nouveaux matériaux et étude d'un régime d'essais approprié.

Examen des pratiques actuelles de construction de chaussées

Un examen des pratiques de construction de chaussées dans les pays participants a fourni des informations précieuses sur les matériaux actuellement utilisés, leurs propriétés, les stratégies d'entretien employées par les administrations routières, ainsi que les coûts des matériaux et de leur entretien. Il existe une cohérence remarquable entre les pays étudiés. Les matériaux utilisés sont similaires et les informations sur leur coût de base ont été suffisamment homogènes pour fournir une valeur exploitable ultérieurement dans les évaluations économiques. Les variations étaient mineures entre trois grandes

régions : Europe occidentale, Amériques et pays nordiques. Outre les niveaux de coût similaires pour l'achat et la pose des matériaux de chaussées, les stratégies d'entretien étaient semblables.

Analyse économique

L'étude a testé la théorie selon laquelle la mise en œuvre d'une chaussée avancée, à longue durée de vie, pour un coût initial plus élevé pourrait être économiquement rentable (en termes de coûts sur la durée de vie), par rapport à une chaussée traditionnelle, lorsque les coûts pour l'utilisateur sont pris en compte. Le chapitre 3 du présent rapport a recensé les aspects qu'il conviendrait de prendre en compte pour une analyse économique et a souligné l'importance que jouent les coûts pour l'utilisateur dans toute analyse. Les routes à forte circulation sont facilement encombrées en raison d'accidents, d'opérations d'entretien ou d'une capacité insuffisante et ces causes de ralentissement provoquent une augmentation des coûts pour l'utilisateur, c'est-à-dire les particuliers et les entreprises industrielles et commerciales, dont les transporteurs routiers et leurs clients, et par conséquent, une population plus large.

Bien que de nombreux aspects puissent être envisagés dans le cadre d'une évaluation économique, leur examen dépend de l'accès à des données suffisamment précises pour effectuer une analyse acceptable. Avec les ordinateurs actuels, il est désormais relativement simple de réaliser ces analyses et divers modèles sont donc disponibles. Le chapitre 3 a examiné les conditions requises pour ce type d'analyse dans un contexte international et a examiné certains des modèles disponibles. Bien qu'il ne s'agisse en aucun cas d'une étude exhaustive, ce projet a permis d'aborder une grande variété de modèles. Deux ont été jugés appropriés en raison de leur large diffusion, de leur simplicité d'utilisation, de leur convivialité et de l'accès à des données correspondantes. Le modèle HDM-4 de la Banque mondiale est largement diffusé et offre un grand nombre de modules mathématiques et logiques qui peuvent être affinés et calibrés pour un pays particulier. Outil puissant, il ne convient pas toujours à une utilisation directe ou simple et les résultats obtenus et exploités dans ce rapport n'ont parfois eu qu'une application limitée. L'autre modèle utilisé pour l'analyse dans ce rapport est une variante (dite PASI) d'un modèle développé au Royaume-Uni pour l'évaluation des projets d'entretien.

Ces modèles ont permis de comparer les coûts sur la durée de vie des options de revêtement traditionnelles et avancés. Les stratégies d'entretien du revêtement avancé, pour différents coûts et charges de trafic, ont été étudiées en appliquant plusieurs coûts initiaux. Les coûts du revêtement avancé étant incertains, les coûts initiaux de ce traitement ont été fixés proportionnellement aux coûts des traitements traditionnels. Il a ainsi été possible de déterminer le coût relatif ou l'augmentation relative du coût auxquels un revêtement avancé serait encore rentable.

Les évaluations de coûts décrites au chapitre 4 ont déterminé les conditions requises pour qu'un revêtement avancé soit économiquement plus avantageux qu'un traitement de surface traditionnel. Des variations du taux d'actualisation, des coûts et des volumes de trafic ont été prises en compte et diverses combinaisons ont été explorées. Les résultats ont montré que, dans un certain nombre de pays, il y aurait un avantage économique à

utiliser un revêtement avancé à longue durée de vie, aux coûts initiaux plus élevés que ceux des couches de roulement traditionnelles. Les analyses de sensibilité effectuées ont révélé que :

- Certaines réductions sont possibles pour les routes à forte circulation (TMJA supérieur à 80 000 véhicules), quel que soit le taux d'actualisation.
- Seuls les projets aux niveaux de trafic les plus élevés permettront une réduction de coûts avec un taux d'actualisation allant jusqu'à 10 %.
- À des niveaux de trafic inférieurs (TMJA avoisinant 60 000), il ne se produira une réduction de coûts qu'avec un taux d'actualisation faible (environ 3 %).
- Pour un TMJA égal ou inférieur à 40 000, il ne se produira probablement pas de réduction de coûts intéressante.
- À moins que les taux d'actualisation soient très faibles (3 %) et les volumes de trafic importants, les couches de roulement d'un coût élevé (cinq fois le coût des couches de roulement traditionnelles) ne sont pas susceptibles d'être économiquement viables.

Les hausses des coûts de la couche de roulement doivent être envisagées dans le contexte des coûts habituels de construction des chaussées. Pour le projet choisi en exemple d'une autoroute à deux fois trois voies, les coûts de construction de la chaussée s'élèveraient de 1.8 million à 2.25 millions d'USD par kilomètre de chaussée. Cette estimation comprend des postes tels que les terrassements, le drainage, le marquage, les barrières de sécurité, etc. Elle ne comprend pas les autres structures telles que les ponts ou les tunnels, les portiques, etc.

À l'heure actuelle, la couche de surface (couche de roulement) de ces chaussées représente entre 9 % et 12 % des coûts indicatifs de construction de chaussées, mentionnés plus haut. Un triplement du coût de la couche de roulement entraînerait une augmentation du coût global de construction de la structure de la chaussée pouvant atteindre 24 % ; la couche de surface représenterait alors environ 30 % des coûts de construction.

Bien entendu, le coût total de construction des routes à forte circulation varie considérablement en fonction non seulement des coûts de construction de la chaussée, mais aussi du nombre de ponts, de tunnels et de terrassements nécessaires. Le coût global moyen par kilomètre de chaussée s'élève de 3.15 millions d'USD à 3.6 millions d'USD, si l'on prend en compte ces autres coûts. Un triplement du coût de la couche de surface de la chaussée a alors un impact inférieur sur le coût global de construction de l'autoroute par kilomètre (entre 10 % et 15 %) et la couche de surface ne représente qu'entre 5 % et 20 % du coût total de construction. Dans le cas d'un projet de route totalement nouvelle, ce pourcentage est même inférieur si le coût total comprend les ouvrages d'art, les acquisitions foncières, les coûts de conception et les communications.

Matériaux et techniques de chaussées avancés

Le chapitre 5 a étudié la disponibilité et les caractéristiques de diverses catégories de matériaux avancés pour chaussées routières. Ces matériaux paraissent susceptibles de répondre aux exigences des couches de roulement à longue durée de vie : longévité, adhérence permanente grâce à une texture continue réduisant les projections d'eau et réalisation dans des conditions rentables. Bon nombre des types de revêtement étudiés n'ont encore jamais été utilisés sur une autoroute ou bien seulement sur des parties d'infrastructures relativement limitées, telles que les tabliers de ponts. Le revêtement de tabliers de ponts nécessite souvent des matériaux exceptionnellement élastiques, résistants mais souples, en raison de contraintes et de déformations accrues par rapport aux matériaux traditionnels. Un des aspects des travaux ultérieurs sur les matériaux avancés consistera à développer des méthodes de mise en œuvre en adaptant ou éventuellement en modifiant la conception des engins de construction routière afin qu'ils assurent un rendement réaliste sur de grandes surfaces.

Après l'examen des matériaux réalisés au chapitre 5, deux types spécifiques de matériaux se sont avérés susceptibles de répondre aux exigences, le bitume epoxy et les bétons à hautes performances

Dans la phase II du projet, il conviendra de poursuivre l'étude de ces matériaux et d'entreprendre les travaux de développement. D'autres matériaux pris en compte au chapitre 5 pourraient également présenter les propriétés requises, mais leurs données ne sont peut-être pas suffisantes pour l'évaluation. Il ne faudrait pas rejeter totalement ces matériaux ou d'autres. Il pourrait être judicieux d'examiner leurs propriétés à un stade ultérieur.

Vers la phase II

Les recommandations pour la réalisation d'un programme de recherche dans le cadre de la phase II ont été définies au chapitre 6 de ce rapport. L'objectif de ces travaux ultérieurs sera d'évaluer la capacité réelle des matériaux candidats et de voir s'ils méritent le statut de couche de roulement à longue durée de vie.

Ces recherches devront déterminer les propriétés requises pour le revêtement avancé en termes de résistance à l'orniérage, à la fissuration, à l'arrachement, au désenrobage et à l'érosion, mais aussi examiner d'autres aspects importants, dont le polissage à long terme, la perte d'adhérence et la réduction des projections d'eau et du bruit. Le chapitre 6 a mis en évidence les critères requis. Il a également envisagé un éventuel programme d'essais et son étendue souhaitable, avec essais en vraie grandeur et utilisation de techniques d'essais de chargements accélérés. La phase II devrait comprendre les étapes suivantes :

Étape 1 : Identifier toutes les données disponibles sur les performances des échantillons de matériaux et les procédés.

Étape 2 : Identifier les « inconnues » en matière de performances qu'il faudra tester.

Étape 3 : Identifier les performances insuffisantes qu'il faudra améliorer.

Étape 4 : Identifier les essais de laboratoire qui peuvent être réalisés dans les laboratoires des pays participants présentés dans ce rapport et ceux proposés par d'autres participants.

Étape 5 : Établir un programme d'essais. Il devra comprendre :

- Les essais d'évaluation pour identifier les inconnues en matière de performances.
- Le programme de développement pour améliorer les performances insuffisantes.

Étape 6 : Évaluer les résultats tirés du programme d'essais. D'autres faiblesses peuvent être identifiées qui nécessiteront un nouveau programme de développement.

Annexe A

Questionnaire – Chaussées souples

Contexte

Les informations obtenues à l'aide de ce questionnaire seront utilisées pour un projet de l'OCDE intitulé « Analyse économique des possibilités techniques des chaussées à longue durée de vie ». Nous avons voulu que ce questionnaire soit aussi concis et direct que possible, pour que vous puissiez transmettre uniquement les informations dont nous avons besoin. Nous vous remercions d'avance de prendre le temps d'y répondre. Ce questionnaire porte sur les pratiques de votre agence en matière de chaussées existantes ou classiques, et notamment de chaussées bitumineuses.

Ce questionnaire a pour objet de recueillir des informations techniques et économiques sur les pratiques de votre agence relatives aux chaussées existantes. Les informations demandées concernent plus spécifiquement la couche superficielle de la chaussée, parfois appelée couche de roulement. Les questions portent sur les coûts initiaux de construction de la couche superficielle de la chaussée ou couche de roulement, sa durée de vie prévue et sa description, ainsi que le calendrier et les coûts des stratégies d'entretien programmées. Des informations brèves sont également demandées sur les procédures de dimensionnement, les matériaux de chaussées utilisés pour cette couche, ainsi qu'une description ou une définition par votre agence de la durée de vie prévue de la chaussée en termes de critères de rupture, tels que l'orniérage, la dégradation et l'uni. Une analyse du cycle de vie ou de la durée de vie sera réalisée. Les résultats seront utilisés pour comparer les pratiques actuelles de l'agence avec celles liées aux chaussées nouvellement mises au point ou à durée de vie potentiellement plus longue. Nous insistons sur le fait que les informations demandées concernent les types de chaussées existantes ou classiques, utilisées sur les routes à forte circulation, et qu'elles portent uniquement sur la couche superficielle.

Plusieurs hypothèses doivent être examinées avant de répondre. Les informations doivent se limiter à la couche de roulement. Les couches structurelles inférieures en matériaux bitumineux ou en béton, la couche de base granulaire et la couche de fondation sont supposées être de bonne qualité et avoir une bonne capacité structurelle. Les informations doivent donc porter sur le dimensionnement, les matériaux, les coûts et l'espérance de vie de la couche de roulement uniquement. Pour mieux définir la couche de roulement, on supposera qu'une structure type est constituée d'un sol support, d'une couche de fondation et/ou de base, d'une ou de plusieurs couche(s) de chaussée intermédiaire(s) et d'une couche de roulement ou couche superficielle. Il s'agit là d'un schéma général ou conceptuel : les épaisseurs peuvent être variables et certaines couches ne sont peut-être pas représentées. Toutefois, aux fins de ce questionnaire, la couche de roulement sera la couche supérieure. On considère que cette couche aura une durée de vie prévue déterminée, un coût initial concernant la couche supérieure uniquement et

nécessitera quelques opérations d'entretien. À la fin de la durée de service, un remplacement, ou éventuellement un rechargement, sera effectué.

Les informations demandées doivent être tirées d'un projet spécifique, au sein de votre agence. De manière générale, nous espérons que sa conception correspondra au schéma décrit plus haut. Le projet doit porter sur une route à forte circulation ou une autoroute/voie rapide à chaussées séparées. Le TMAJ prévu doit être au moins égal à 10 000 et comprendre 15 % de poids lourds. On supposera que la construction de ce projet impliquera l'utilisation de matériaux et de techniques types ou de grande qualité. Le dimensionnement devra assurer une capacité structurelle et un drainage de grande qualité.

Les informations demandées ne doivent concerner qu'un seul projet du ressort de votre agence et considéré comme représentatif du type d'infrastructure décrite ci-dessus. Un espace a été réservé aux commentaires après chaque question. Si vous estimez que certaines informations complémentaires seraient précieuses pour l'analyse, veuillez ajouter les remarques qui vous semblent appropriées. Ce questionnaire sera envoyé aux pays de l'OCDE. L'analyse des coûts sur la durée de vie comprend les coûts pour l'usager dus au temps d'attente. Elle pourrait aboutir à la conclusion que des matériaux de chaussées de haute technologie ou différents peuvent remplacer les chaussées classiques actuellement en service. Nous vous remercions d'avoir consacré du temps à répondre à ce questionnaire.

Conception des structures de chaussée existantes

Pourriez-vous nous fournir les informations suivantes, sur un projet entrepris dans le ressort de votre agence, tel que décrit plus haut ?

Informations générales

Emplacement du projet

Brève description du projet (par exemple, construction d'une nouvelle route à quatre voies, de x km, équipée de deux ponts)

.....

Brève description de la structure de chaussée de ce projet

.....

Volume approximatif de matériaux bitumineux (en tonnes) pour la couche de roulement de ce projet

Commentaires

Climat

Veillez cocher la case correspondant au climat sur le site du projet.

HUMIDE/SANS GEL HUMIDE/AVEC GEL
 SEC/SANS GEL SEC/AVEC GEL

Le site est-il soumis à des cycles de gel/dégel ?

Oui Non Si oui, combien par hiver ?

Commentaires ou remarques particulières concernant le climat sur le site du projet.....

Trafic

Le projet doit concerner une infrastructure à forte circulation. Veuillez fournir les données suivantes :

TMJA (approximatif)

Équivalent de charge par essieu simple approximatif (essieu 80 kN).....
 ou selon définition (essieu 100 kN).....

Pourcentage de poids lourds.....

Commentaires ou remarques particulières concernant le trafic.....

Critères de dimensionnement

Veillez décrire brièvement votre procédure de dimensionnement des chaussées (par exemple, AASHTO ou autre) :

.....

Merci de répondre aux questions suivantes :

Pour le dimensionnement, quel critère concernant la fissuration par fatigue (déformation en traction horizontale sous la couche de bitume) utilisez-vous ?

Pour le dimensionnement, quel critère concernant la déformation structurelle (déformation en compression verticale à la surface de la couche de fondation) utilisez-vous ?

Pour le dimensionnement, quelles valeurs de résistance élastique ou de module d'élasticité utilisez-vous ?

Avez-vous d'autres critères de dimensionnement ?

Durée de conception : années .. Équivalent de charge par essieu simple

Critère de rupture. Quelle valeur limite ou plafond à la fin de la durée de vie de la chaussée prenez-vous en compte pour les paramètres suivants ?

Rugosité (IRI)..... ou autre mesure de rugosité

Orniérage (mm).....

Fatigue (%).....

Dégradation (fissuration thermique ou autre)

Prenez-vous en compte les coûts pour l'utilisateur ?

Oui Non

Envisageriez-vous une couche de roulement en béton comme solution de rechange ?

Oui Non

Commentaires

Exigences relatives aux coûts, aux matériaux et aux performances des chaussées

Veillez compléter la colonne 1 ci-dessous avec les données concernant la couche de roulement du projet choisi. Si vous utilisez occasionnellement des matériaux différents ou complémentaires pour les couches de roulement, veuillez compléter les colonnes 2 ou 3. Par exemple : la colonne 1 peut concerner un matériau classique de première classe et la colonne 2 peut concerner un asphalte coulé gravillonné ou un mélange Superpave.

Valeurs types pour le matériau retenu	Type ou nom du matériau		
	1.....	2.....	3.....
Coût initial en USD par mètre carré Voir remarque 1 ci-dessous
Épaisseur de la couche de roulement du projet (mm)
Informations utiles			
Teneur approximative en bitume
Taux de compactage déterminé
Courbe granulométrique (% du poids du matériau)			
Pierre / sable / fines d'apport/...../...../...../...../...../.....
Taille maximale du granulat (mm)
Teneur en vides déterminée (%)
Rigidité (module réversible, s'il est connu)
Type de bitume par classe de pénétrabilité
Commentaires sur le granulat
Polymères utilisés (oui ou non)
Teneur en polymère (% du poids du liant, si utilisé)
Teneur en fibres (% du poids du liant, si utilisées)
Autres adjuvants (veuillez préciser : latex, caoutchouc, etc.)
Exigences de performance			
Résistance à l'orniérage (mm)
Uni (spécifications, si utilisées)
Bruit (spécifications, si utilisées)
Adhérence (spécifications, si utilisées)

Remarque 1 : Les coûts initiaux sont un facteur important dans cette étude. À des fins de cohérence, le coût initial ne doit comprendre que les coûts des matériaux bitumineux, du malaxage, du transport et de la mise en œuvre. En d'autres mots, ce sont les coûts tout compris de l'offre du maître d'œuvre relative aux travaux. Ils ne comprennent pas les coûts de conception ou les coûts de surveillance des travaux en régie ni les autres coûts accessoires du projet. Ils ne concernent que la couche de roulement et non les couches structurelles inférieures. Merci d'indiquer les coûts en USD par mètre carré.

Commentaires

Stratégies d'entretien prévues

Pour chaque couche de roulement mentionnée sur le tableau précédent, veuillez indiquer une estimation des opérations, du calendrier et des coûts d'entretien. Merci de compléter le tableau ci-dessous.

Type ou nom du matériau (n°)	Opérations d'entretien prévues						Remarques
	Opération d'entretien prévue Code (voir plus bas)	Calendrier approximatif (années après la construction)	Indicateur de performance critères d'intervention (seuils)		Coûts (USD/km de voie)	Durée du chantier (jours par km/voie)	
			Code	Valeur			
1.							
2.							
3.							
Exemple : « matériau classique N° 1 »	SF	Années 3, 6 et 12	S SUP + S STR	5 %	4 000	2	Scellement de fissures aux années 3, 6 et 12 avec emplois partiels et coulis bitumineux prévus, fraisage et remplacement complets à l'année 15
	EP	8	F STR	Toutes	10 000	2	
	CB	10	A	10 % (de la zone)	15 000	1.5	
	FR	15	O	15 mm	28 000	1	

Opérations d'entretien prévues	CODE	Indicateur de performance	CODE
Scellement de fissures	SF	Orniérage	O
Emplois partiels	EP	Adhérence	A
Film d'étanchéité	FÉ	Adéquation structurelle (déflexion)	AS
Regénération	R	Fissuration superficielle	F SUP
Coulis bitumineux	CB	Fissuration structurelle	F STR
Gravillonnage superficiel ou grave maigre	G	Arrachement	A
Rechargement mince	RM	Uni (IRI)	U
Rechargement ou fraisage et remplacement (fin de vie)	FR		

Annexe B

Modèles de coûts du cycle de vie étudiés

Évaluation des modèles

Les modèles énumérés dans ce document ne doivent pas être considérés comme les seuls qui auraient pu convenir. En effet, dans le cadre de ce rapport, il n'était pas nécessaire d'effectuer une enquête sur tous les modèles possibles pour l'évaluation des coûts des chaussées sur la durée de vie. Nous indiquons ci-dessous les modèles qui ont été faciles d'accès, ainsi que quelques données générales, pour information.

HDM-4

HDM-4 est un outil de développement et de gestion des routes permettant d'analyser les choix d'investissement dans le domaine routier. Il est financé par la Banque mondiale ; sa gestion et la coordination de son développement ont été confiées à l'AIPCR. Ses premières versions étaient essentiellement adaptées aux pays en développement, mais le champ d'application de sa dernière version a été élargi afin qu'il puisse répondre aux différents besoins des administrations routières, des concepteurs et des organismes de financement du monde entier. Particulièrement approprié auparavant aux climats tropicaux, il convient désormais aussi aux climats de gel. Il est actuellement enregistré dans près de 100 pays.

PaveSpec3.0 (béton) – FHWA

Ce modèle pour chaussées en béton uniquement peut étudier les coûts sur la durée de vie, dans le cadre d'un logiciel conçu pour élaborer des spécifications liées à la performance. Il permet de définir plusieurs stratégies d'entretien et d'effectuer des comparaisons de coûts sur la durée de vie, selon différentes spécifications. Il ne concerne que les chaussées en béton avec joints, mais permet la saisie des coûts pour l'utilisateur (temps de parcours, coûts d'exploitation des véhicules, coûts des accidents et coûts liés au désagrément), auxquels peut être affecté un pourcentage fixe. L'utilisateur ne peut pas facilement séparer le calcul des coûts futurs des autres résultats ni comparer différentes évaluations côte à côte. Tous les montants sont en USD, et les mesures en pouces, pieds, yards et miles.

HMA Spec (version de PavSpec3 pour chaussées souples) – FHWA

Une version du modèle précédent pour chaussées souples est en cours de développement. Elle n'était pas encore disponible lors de la rédaction de ce rapport.

Logiciel LCCA – FHWA (RealCost)

Basé sur une feuille de calcul Excel, ce logiciel analyse les écarts de coûts entre différents projets. Il utilise la méthode LCCA (analyse des coûts sur la durée de vie), recommandée dans les bonnes pratiques de la FHWA. Il calcule les coûts sur la durée de vie pour l'agence et pour l'utilisateur, liés à la construction et à la remise en état de la structure de chaussée examinée. L'utilisateur doit saisir ses coûts de construction ou de remise en état. En revanche, le logiciel calcule les coûts pour l'utilisateur.

Le logiciel effectue une modélisation déterministe et probabiliste des chaussées et affiche les résultats sous forme de tableaux ou de graphiques. Dans une analyse probabiliste, les résultats sont énormément variés ; ils comprennent, entre autres, les fonctions de distribution des probabilités et de répartition. La méthode de calcul des coûts pour l'utilisateur consiste à comparer la demande de trafic avec la capacité de la route heure par heure, en examinant les conditions de circulation résultantes. Le logiciel peut effectuer une analyse pour une période maximale de 40 ans.

Les coûts pour l'utilisateur sont calculés selon une méthode normalisée de la FHWA, fondée sur l'expérience américaine. Ces coûts sont fixes par défaut, mais l'utilisateur peut saisir ses propres coûts. Le logiciel ne fonctionne que sur Excel 2000 et n'est pas compatible avec les versions antérieures. Tous les montants sont actuellement présentés en USD, et les mesures en miles, pieds et mph. Rien n'empêche d'utiliser les unités métriques si toutes les données d'entrée sont correctement converties, mais l'écran continuera d'afficher les mesures américaines initiales en référence. Il semble que le logiciel puisse être facilement adapté pour afficher d'autres mesures ou bien aucune. L'utilisateur peut saisir ses propres descriptions, coûts et délais d'opérations d'entretien ; le logiciel peut donc analyser les chaussées bitumineuses et en béton.

Pav-Eco

Il s'agit du 4^e projet cadre de la Commission européenne, qui a étudié l'évaluation des coûts des chaussées sur la durée de vie, ainsi que les effets de l'entretien des infrastructures routières sur de nouvelles liaisons au sein d'un réseau routier. Ce projet n'a pas élaboré de modèle déterminé, mais des directives universelles et un cadre pour la comparaison des coûts sur la durée de vie, en fonction de différentes stratégies. Les expériences recueillies et le cadre élaboré au cours du projet ont abouti à un travail de développement d'un nouveau modèle de coûts européen. Ce dernier n'était pas encore disponible lors de la rédaction de ce rapport.

TRDI – Québec

La province de Québec utilise un modèle de coûts sur la durée de vie, développé par TRDI (Texas Research and Development, Inc.), au sein de son système de gestion des chaussées. Ce logiciel est également utilisé dans certains états américains. L'utilisateur peut saisir ses propres coûts d'opérations d'entretien. Les coûts autres que ceux des travaux (coûts du temps perdu ou coûts pour l'utilisateur) sont inclus dans l'analyse, mais sont fixes et basés sur l'expérience américaine. Ce logiciel est disponible sur le marché. Il

est stable et réputé pour être convivial et accessible. Il propose les options de modélisation déterministe et probabiliste.

Colorado

Ce modèle a été développé par la Colorado Asphalt Association. L'utilisateur peut saisir ses propres coûts d'entretien et sélectionner plusieurs options d'entretien, y compris celles qu'il a définies. L'analyse n'inclut pas les coûts pour l'utilisateur et il n'est pas possible de saisir des informations sur le trafic.

LCCA – United States Asphalt Pavement Alliance

Ce logiciel réclame les mêmes données d'entrée que le logiciel de la FHWA décrit plus haut. Il peut aussi effectuer des analyses déterministes et probabilistes, bien que la présentation des résultats soit moins graphique. Il permet le calcul des coûts pour l'utilisateur, également fondé sur les principes de la FHWA. L'utilisateur peut effectuer des modifications de ces coûts, s'il est expérimenté. Toutes les mesures sont américaines. Il semble qu'elles ne puissent pas être modifiées. Mais si toutes les données d'entrée sont métriques, les réponses le seront également. L'utilisateur peut saisir ses propres descriptions, coûts et délais d'opérations d'entretien. Le logiciel peut donc analyser les chaussées bitumineuses et en béton ; il possède une option de saisie limitée des coûts liés aux délais, qui peut être utile pour les chaussées en béton.

SAS – Royaume-Uni

Basé sur une feuille de calcul Excel, ce modèle permet à l'utilisateur de comparer les options pour différentes stratégies d'entretien. Cet outil prend en compte les coûts pour l'utilisateur, la valeur résiduelle et les traitements réalisés sur les différentes voies de la route. L'utilisateur peut saisir toutes les données liées au contexte local ou utiliser des valeurs types tirées des valeurs disponibles au Royaume-Uni. Il doit entrer un profil d'entretien approprié, les coûts associés et les rendements des travaux. Ce modèle, qui peut être adapté pour un usage international, convient aux chaussées en béton et aux chaussées bitumineuses.

Annexe C

Application du modèle HDM-4

Le modèle HDM-4 version 1.3 a été utilisé pour évaluer la viabilité économique des chaussées revêtues d'une couche de roulement à longue durée de vie. L'analyse économique s'est appuyée sur le concept « d'analyse du cycle de vie » et l'application d'analyse de projet a été retenue pour cette évaluation. Les principaux éléments de l'analyse ont été les suivants :

- Performances des chaussées.
- Prédiction des dégradations sur le cycle de vie.
- Effets et coûts de l'entretien.
- Coûts et avantages pour l'utilisateur, total des coûts de transport.
- Indicateurs économiques pour d'autres solutions d'entretien et d'amélioration déterminées.

Pour ce rapport, le mode d'analyse « par section » a été spécifié pour déterminer les comparaisons économiques des deux projets examinés, c'est-à-dire avec la couche de roulement traditionnelle ou avec la chaussée revêtue d'une couche de roulement avancée, à longue durée de vie.

La procédure d'analyse de projet utilisée a été la suivante :

- Description du projet spécifiant les éléments suivants :
 1. Section de route à analyser : la résistance de la chaussée a été caractérisée par le nombre structural ajusté, calculé en fonction de l'épaisseur des couches, les coefficients de résistance des couches et l'indice portant californien (CBR) de la couche de fondation.
 2. Flotte de véhicules contenant les types de véhicules qui circulent sur la section analysée.
 3. Trafic moyen journalier annuel (TMJA), composition du trafic et croissance prévue pour chaque type de véhicule. Six types de véhicules ont été sélectionnés : voiture particulière, véhicule utilitaire, autobus, camion moyen, poids lourd, camion articulé.
 4. Solutions à analyser, en tant que séries d'opérations d'entretien à réaliser sur la section.
- Spécification du taux d'actualisation, de l'année de lancement et de la durée de l'analyse.
- Sélection des résultats requis.
- Réalisation d'analyses de sensibilité par variation des valeurs des paramètres d'entrée sélectionnés : TMJA, taux de croissance du trafic, taux d'actualisation. Les valeurs utilisées ont été les mêmes que pour l'analyse à l'aide du modèle PASI. Les intervalles spécifiques entre les opérations d'entretien de chaque

solution ont été définis pour chaque catégorie de charge de trafic (TMJA, croissance du trafic).

Il a été nécessaire d'apporter quelques modifications à l'analyse de projet HDM-4 type en raison du nombre limité de données d'entrée disponibles concernant les modèles de performance. Des facteurs de calibrage (coefficients) ont été généralement utilisés pour adapter les modèles de performance et les modèles de dégradation, afin de refléter les conditions climatiques et environnementales spécifiques de la section de route donnée. Plusieurs solutions proposées pour les sections de route ont été analysées, afin de déterminer la solution la plus rentable pour chacune d'elles.

Les analystes disposaient des caractéristiques d'une section de route d'essai, basées sur les informations obtenues grâce aux réponses au questionnaire. Ils ont réalisé l'analyse sur les deux projets proposés, avec la série d'opérations d'entretien sélectionnées, à intervalles réguliers et pour la catégorie de charge de trafic donnée, obtenue grâce aux résultats de l'enquête et faisant partie des scénarios standard admis.

Les niveaux d'intervention (valeurs seuils) pour les paramètres de performance et/ou de dégradation sélectionnés, le type de traitement et l'effet résultant sur la chaussée ont fourni une caractéristique de performance de la chaussée pour les deux projets proposés. Aucun facteur de calibrage n'était disponible, mais les informations admises sur les performances ont permis de simuler des courbes de performances par essais erreurs, en partant d'une valeur par défaut de 1 pour les facteurs de calibrage les plus sensibles. On a ainsi obtenu des courbes de performances reflétant les valeurs seuils et les intervalles spécifiques pour les interventions d'entretien de chaque solution. La rugosité moyenne (IRI en m/km par section) a été utilisée pour vérifier si l'étape suivante de la simulation des performances était adaptée.

De manière générale, une seule série de facteurs de calibrage a été définie pour chaque section de route. Pour simuler les performances améliorées de la solution avec couche de roulement avancée, une opération d'entretien apparent (avec coûts unitaires proches de 0), lors de la première année du cycle d'analyse, a été incluse dans la série des travaux d'entretien. Cela a permis d'appliquer une série de facteurs de calibrage différente de celle utilisée pour la première solution.

Comme indiqué au chapitre 4, les CEV obtenus avec le modèle HDM-4 ne présentaient que de légères différences selon les types de revêtements, sans aucune tendance nette. On avait espéré que cette modélisation fournirait des données sur les coûts d'exploitation des véhicules qui pourraient être incluses dans l'analyse. Mais, comme le montre le tableau 4.4, les différences sont faibles et ne modifient pas le résultat des comparaisons.

Une variante de cette modélisation initiale intégrait des données plus courantes dans les pays d'Europe orientale. Comme indiqué au chapitre 4, avec cette variante utilisant un IRI plus élevé, les coûts d'exploitation des véhicules présentaient, sans aucune surprise, une différence augmentant proportionnellement à la dégradation de la route.

*Annexe D***Modèle PASI – Saisie de données et résultats****Données d'entrée**

Hypothèses émises dans le cadre de l'analyse à l'aide du modèle PASI :

Année de base	2003	
Période d'évaluation	45 ans	
Longueur du projet	4 km	
Longueur de route fermée pour gestion du trafic	5 km	
Taux de croissance du trafic	1% (sauf pour les résultats présentés au tableau 4.6)	
Rendement	Traditionnel 30 mm :	600 m ² /h
	Traditionnel 100 mm :	450 m ² /h
	Avancé :	600 m ² /h
	Régénération :	1 200 m ² /h
Modalité des travaux	Travaux de nuit pour toutes les opérations d'entretien (sauf pour les résultats présentés au tableau 4.5)	

Les coûts et les rendements ne sont pas influencés par les horaires des travaux (jour ou nuit).

Les modalités de gestion du trafic pendant les opérations d'entretien ont été basées sur deux variantes en fonction des volumes de trafic. Elles prévoyaient toujours une circulation à contresens, c'est-à-dire qu'une ou plusieurs voies sont déviées sur l'autre chaussée latérale au terre-plein central, qui abrite alors plusieurs voies circulant en sens inverse, clairement définies et séparées. Pour les TMJA de 40 000 et 60 000, les modalités de gestion du trafic ont prévu une circulation sur deux voies dans chaque sens, pendant les travaux. Pour les volumes de trafic plus élevés (TMJA de 80 000 et 100 000), les modalités de gestion du trafic ont prévu un rétrécissement des voies, avec deux voies dans un sens et trois voies dans l'autre.

Différence dans la VAN et le pourcentage de réduction

Chaussée avancée = 3 fois plus coûteuse que la chaussée traditionnelle, durée de vie 30 ans

Trafic	Poids lourds	40 000					60 000					80 000					100 000							
		5%	10%	15%	20%	20%	5%	10%	15%	20%	20%	5%	10%	15%	20%	20%	5%	10%	15%	20%				
Taux d'act. 3%	Trad	2 362,83	2 364,44	2 366,08	2 367,68	2 368,09	2 516,55	2 673,68	2 833,39	2 993,09	2 993,09	4 442,12	4 839,67	5 237,21	5 634,79	6 032,33	6 429,87	6 827,41	7 224,95	7 622,49	8 020,03	8 417,57	8 815,11	9 212,65
	Avancée	2 503,49	2 504,90	2 506,34	2 507,77	2 508,19	2 587,11	2 688,07	2 790,90	2 893,73	2 893,73	3 564,71	3 758,88	3 952,84	4 146,92	4 340,99	4 534,99	4 728,99	4 922,99	5 116,99	5 310,99	5 504,99	5 698,99	5 892,99
	Diff	-140,66	-140,46	-140,26	-140,09	-139,90	-70,56	5,61	82,49	159,36	159,36	877,41	1 080,88	1 284,37	1 487,87	1 691,36	1 894,85	2 098,34	2 301,83	2 505,32	2 708,81	2 912,30	3 115,79	3 319,28
	%	-5,95	-5,94	-5,93	-5,92	-5,91	-2,80	0,21	2,91	5,32	5,32	28,74	35,36	35,36	35,36	35,36	35,36	35,36	35,36	35,36	35,36	35,36	35,36	35,36
	6%	Trad	1 581,32	1 582,03	1 582,74	1 583,46	1 584,17	1 654,94	1 714,38	1 774,62	1 834,87	1 834,87	2 048,84	2 077,21	2 106,09	2 134,95	2 163,81	2 192,67	2 221,53	2 250,39	2 279,25	2 308,11	2 336,97	2 365,83
Avancée	2 007,60	2 008,10	2 008,60	2 009,10	2 009,60	2 048,84	2 077,21	2 106,09	2 134,95	2 134,95	2 550,55	2 653,31	2 756,05	2 858,80	2 961,55	3 064,30	3 167,05	3 269,80	3 372,55	3 475,30	3 578,05	3 680,80	3 783,55	
Diff	-426,28	-426,07	-425,86	-425,64	-425,43	-393,90	-362,83	-331,47	-300,08	-300,08	97,70	200,19	302,70	405,21	507,72	610,23	712,74	815,25	917,76	1 020,27	1 122,78	1 225,29	1 327,80	
%	-26,96	-26,93	-26,91	-26,88	-26,86	-23,80	-21,16	-18,68	-16,35	-16,35	3,69	7,02	9,90	12,41	14,92	17,43	20,00	22,57	25,14	27,71	30,28	32,85	35,42	
8%	Trad	1 293,49	1 293,92	1 294,37	1 294,81	1 295,25	1 344,55	1 377,65	1 411,17	1 444,65	1 444,65	2 032,62	2 175,74	2 318,87	2 462,00	2 605,13	2 748,26	2 891,39	3 034,52	3 177,65	3 320,78	3 463,91	3 607,04	3 750,17
	Avancée	1 843,59	1 843,85	1 844,11	1 844,37	1 844,63	1 873,94	1 889,05	1 904,41	1 919,74	1 919,74	2 217,20	2 290,72	2 365,25	2 439,78	2 514,31	2 588,84	2 663,37	2 737,90	2 812,43	2 886,96	2 961,49	3 036,02	3 110,55
	Diff	-550,10	-549,93	-549,74	-549,56	-549,38	-529,39	-511,40	-493,24	-475,09	-475,09	-184,58	-114,98	-46,38	24,23	70,18	130,07	189,96	249,85	309,74	369,63	429,52	489,41	549,30
	%	-42,53	-42,50	-42,47	-42,44	-42,41	-39,37	-37,12	-34,95	-32,89	-32,89	-14,06	-8,28	-2,00	1,24	3,11	5,98	8,85	11,72	14,59	17,46	20,33	23,20	26,07
	10%	Trad	1 104,99	1 105,28	1 105,57	1 105,85	1 106,14	1 143,88	1 163,42	1 183,13	1 202,84	1 202,84	1 645,06	1 750,88	1 856,70	1 962,53	2 068,35	2 174,17	2 280,00	2 385,82	2 491,64	2 597,46	2 703,28	2 809,10
Avancée	1 745,62	1 745,77	1 745,92	1 746,06	1 746,21	1 770,53	1 779,12	1 787,81	1 796,51	1 796,51	2 017,11	2 073,39	2 129,68	2 185,98	2 242,28	2 298,58	2 354,88	2 411,18	2 467,48	2 523,78	2 580,08	2 636,38	2 692,68	
Diff	-640,63	-640,49	-640,35	-640,21	-640,07	-626,65	-615,70	-604,68	-593,67	-593,67	-372,05	-322,51	-272,98	-223,45	-173,92	-124,39	-74,86	-25,33	24,20	73,67	123,14	172,61	222,08	
%	-57,98	-57,95	-57,92	-57,89	-57,86	-54,78	-52,92	-51,11	-49,36	-49,36	-22,62	-18,42	-14,70	-11,39	-8,06	-4,73	-1,40	1,93	4,26	6,59	8,92	11,25	13,58	

Durée de vie 40 ans

Trafic	Poids lourds	40 000					60 000					80 000					100 000							
		5%	10%	15%	20%	20%	5%	10%	15%	20%	20%	5%	10%	15%	20%	20%	5%	10%	15%	20%				
Taux d'act. 3%	Trad	2 362,83	2 364,10	2 366,10	2 367,70	2 367,70	2 516,55	2 673,70	2 833,40	2 993,09	2 993,09	4 442,12	4 839,67	5 237,21	5 634,79	6 032,33	6 429,87	6 827,41	7 224,95	7 622,49	8 020,03	8 417,57	8 815,11	9 212,65
	Avancée	1 931,06	1 931,70	1 932,40	1 933,04	1 933,04	2 019,56	2 109,60	2 201,50	2 293,30	2 293,30	2 859,86	3 027,76	3 195,69	3 363,62	3 531,55	3 700,00	3 868,45	4 036,90	4 205,35	4 373,80	4 542,25	4 710,70	
	Diff	431,77	432,40	433,70	434,66	434,66	496,99	564,10	631,90	699,79	699,79	1 582,26	1 811,91	2 041,52	2 271,17	2 500,78	2 730,39	2 959,96	3 189,51	3 419,06	3 648,61	3 878,16	4 107,71	
	%	18,27	18,29	18,33	18,36	18,36	19,75	21,10	22,30	23,38	23,38	35,62	37,44	38,98	40,31	41,64	42,97	44,30	45,63	46,96	48,29	49,62	50,95	52,28
	6%	Trad	1 581,32	1 583,03	1 582,74	1 583,46	1 583,46	1 654,94	1 714,40	1 774,60	1 834,87	1 834,87	2 048,84	2 077,21	2 106,09	2 134,95	2 163,81	2 192,67	2 221,53	2 250,39	2 279,25	2 308,11	2 336,97	2 365,83
Avancée	1 744,55	1 744,80	1 745,04	1 745,29	1 745,29	1 786,24	1 816,70	1 847,90	1 879,01	1 879,01	2 153,15	2 234,89	2 316,61	2 398,34	2 480,07	2 561,80	2 643,53	2 725,26	2 807,00	2 888,73	2 970,46	3 052,19	3 133,92	
Diff	-163,23	-161,77	-162,30	-161,83	-161,83	-131,30	-102,30	-73,30	-44,14	-44,14	104,35	137,69	170,52	203,35	236,18	268,99	301,82	334,65	367,48	400,31	433,14	465,97	498,80	
%	-10,32	-10,22	-10,25	-10,22	-10,22	-7,93	-5,97	-4,13	-2,41	-2,41	6,57	6,57	7,71	8,85	10,00	11,14	12,28	13,42	14,56	15,70	16,84	17,98	19,12	
8%	Trad	1 293,49	1 293,92	1 294,37	1 294,81	1 294,81	1 344,55	1 377,65	1 411,17	1 444,65	1 444,65	2 032,62	2 175,74	2 318,87	2 462,00	2 605,13	2 748,26	2 891,39	3 034,52	3 177,65	3 320,78	3 463,91	3 607,04	
	Avancée	1 678,25	1 678,38	1 678,51	1 678,64	1 678,64	1 708,02	1 723,60	1 738,40	1 753,20	1 753,20	1 936,49	1 993,53	2 050,58	2 107,64	2 164,70	2 221,76	2 278,82	2 335,88	2 392,94	2 450,00	2 507,06	2 564,12	
	Diff	-384,76	-384,46	-384,14	-383,83	-383,83	-363,47	-346,00	-327,20	-310,62	-310,62	92,87	117,79	142,71	167,63	192,55	217,47	242,39	267,31	292,23	317,15	342,07	366,99	
	%	-29,75	-29,71	-29,68	-29,64	-29,64	-27,03	-25,12	-23,19	-21,50	-21,50	4,57	5,43	6,29	7,15	8,01	8,87	9,73	10,59	11,45	12,31	13,17	14,03	
	10%	Trad	1 104,99	1 105,28	1 105,57	1 105,85	1 105,85	1 143,88	1 163,40	1 183,10	1 202,84	1 202,84	1 645,06	1 750,88	1 856,70	1 962,53	2 068,35	2 174,17	2 280,00	2 385,82	2 491,64	2 597,46	2 703,28	
Avancée	1 637,75	1 637,82	1 637,89	1 637,97	1 637,97	1 661,69	1 670,00	1 678,50	1 687,02	1 687,02	1 813,22	1 856,83	1 900,43	1 944,04	1 987,64	2 031,25	2 074,85	2 118,46	2 162,06	2 205,67	2 249,27	2 292,88		
Diff	-532,76	-532,54	-532,32	-532,12	-532,12	-517,81	-506,60	-495,40	-484,18	-484,18	-168,16	-105,95	-43,73	18,49	56,38	114,77	173,15	231,53	290,91	349,29	407,67	466,05		
%	-48,21	-48,18	-48,15	-48,12	-48,12	-45,27	-43,54	-41,87	-40,25	-40,25	-15,22	-6,05	-2,36	0,94	2,47	5,96	9,45	12,94	16,43	19,92	23,41	26,90		

Différence dans la VAN et le pourcentage de réduction

Chaussée avancée = 5 fois plus coûteuse que la chaussée traditionnelle, durée de vie 30 ans

Trafic	40 000					60 000					80 000					100 000					
	5%	10%	15%	20%		5%	10%	15%	20%		5%	10%	15%	20%		5%	10%	15%	20%		
Poids lourds																					
Taux d'act. 3%																					
Trad	2 362,83	2 364,44	2 366,08	2 367,68	2 369,32	2 516,55	2 673,70	2 833,39	2 993,09	4 442,12	4 839,67	5 237,21	5 634,79	6 046,87	7 620,70	8 394,52	9 168,35				
Avancée	3 860,36	3 861,77	3 863,21	3 864,64	3 866,08	3 943,98	4 024,94	4 107,77	4 190,60	4 921,58	5 115,65	5 309,71	5 503,79	6 164,23	6 562,41	6 960,61	7 358,80				
Diff	-1 497,53	-1 497,33	-1 497,13	-1 496,96	-1 496,76	-1 427,43	-1 351,24	-1 274,38	-1 197,51	-479,46	-275,98	-72,50	131,00	682,64	1 058,29	1 433,91	1 809,55				
%	-63,38	-63,33	-63,27	-63,22	-63,17	-56,72	-50,54	-44,98	-40,01	-10,79	-5,70	-1,38	2,32	9,97	13,89	17,08	19,74				
6%																					
Trad	1 581,32	1 582,03	1 582,74	1 583,46	1 584,17	1 654,94	1 714,38	1 774,62	1 834,87	2 648,25	2 853,50	3 058,75	3 264,01	4 015,35	4 439,49	4 863,66	5 287,82				
Avancée	3 135,87	3 136,37	3 136,87	3 137,37	3 137,87	3 177,11	3 205,48	3 234,36	3 263,77	3 678,82	3 781,58	3 884,32	3 987,07	4 435,10	4 669,30	4 903,48	5 137,68				
Diff	-1 554,55	-1 554,34	-1 554,13	-1 553,91	-1 553,70	-1 522,17	-1 491,10	-1 459,74	-1 428,90	-1 030,57	-928,08	-825,57	-723,06	-419,75	-229,81	-39,82	150,14				
%	-98,31	-98,25	-98,19	-98,13	-98,07	-91,98	-86,98	-82,26	-77,87	-31,22	-28,52	-26,99	-22,15	-10,45	-5,18	-0,82	2,84				
8%																					
Trad	1 293,49	1 293,92	1 294,37	1 294,81	1 295,25	1 344,55	1 377,65	1 411,17	1 444,65	2 032,62	2 175,74	2 318,87	2 462,00	3 058,19	3 370,39	3 682,58	3 994,78				
Avancée	2 900,04	2 900,30	2 900,56	2 900,82	2 901,08	2 930,39	2 945,50	2 960,66	2 976,19	3 273,65	3 347,17	3 420,70	3 494,22	3 872,18	4 054,26	4 236,36	4 418,44				
Diff	-1 606,55	-1 606,38	-1 606,19	-1 606,01	-1 605,83	-1 585,84	-1 567,85	-1 549,69	-1 531,54	-1 241,03	-1 171,43	-1 101,83	-1 032,22	-813,99	-683,87	-553,78	-423,66				
%	-124,20	-124,15	-124,09	-124,03	-123,97	-117,95	-113,81	-109,82	-106,01	-61,06	-53,84	-47,52	-41,93	-26,62	-20,29	-15,04	-10,61				
10%																					
Trad	1 104,99	1 105,28	1 105,57	1 105,85	1 106,14	1 143,88	1 163,42	1 183,13	1 202,84	1 645,06	1 750,88	1 856,70	1 962,53	2 461,82	2 706,99	2 952,16	3 197,35				
Avancée	2 761,65	2 761,80	2 761,95	2 762,09	2 762,24	2 786,56	2 795,15	2 803,84	2 812,54	3 033,14	3 089,42	3 145,71	3 202,01	3 537,36	3 688,80	3 840,24	3 991,67				
Diff	-1 656,66	-1 656,52	-1 656,38	-1 656,24	-1 656,10	-1 642,68	-1 631,73	-1 620,71	-1 609,70	-1 388,08	-1 338,54	-1 289,01	-1 239,48	-1 075,54	-981,81	-888,08	-794,32				
%	-149,93	-149,87	-149,82	-149,77	-149,72	-143,61	-140,25	-136,98	-133,82	-84,38	-76,45	-69,42	-63,16	-43,69	-36,27	-30,08	-24,84				

Durée de vie 40 ans

Trafic	40 000					60 000					80 000					100 000					
	5%	10%	15%	20%		5%	10%	15%	20%		5%	10%	15%	20%		5%	10%	15%	20%		
Poids lourds																					
Taux d'act. 3%																					
Trad	2 362,83	2 364,08	2 366,08	2 367,70	2 369,32	2 516,55	2 673,70	2 833,40	2 993,09	4 442,12	4 839,67	5 237,21	5 634,79	6 046,87	7 620,70	8 394,50	9 168,35				
Avancée	2 964,26	2 964,92	2 965,58	2 966,24	2 966,90	3 052,76	3 142,80	3 234,70	3 326,69	3 893,06	4 060,96	4 228,89	4 396,00	4 978,74	5 339,40	5 700,10	6 060,73				
Diff	-601,43	-600,84	-599,50	-598,54	-597,58	-536,21	-469,10	-401,30	-333,60	549,06	778,71	1 008,32	1 238,79	1 868,13	2 263,30	2 694,40	3 107,62				
%	-25,45	-25,42	-25,34	-25,28	-25,22	-21,31	-17,54	-14,16	-11,15	12,36	16,09	19,25	21,98	27,28	29,77	32,10	33,90				
6%																					
Trad	1 581,32	1 582,03	1 582,74	1 583,46	1 584,17	1 654,94	1 714,40	1 774,62	1 834,87	2 648,25	2 853,50	3 058,75	3 264,01	4 015,35	4 439,50	4 863,70	5 287,82				
Avancée	2 737,85	2 738,10	2 738,34	2 738,59	2 738,83	2 779,54	2 810,00	2 841,20	2 872,31	3 146,45	3 228,19	3 309,91	3 391,64	3 774,31	3 972,60	4 170,90	4 369,25				
Diff	-1 156,53	-1 156,07	-1 155,60	-1 155,13	-1 154,66	-1 124,60	-1 095,60	-1 066,60	-1 037,44	-498,20	-374,69	-251,16	-127,63	241,00	466,90	692,80	918,57				
%	-73,14	-73,08	-73,01	-72,95	-72,89	-67,95	-63,91	-62,86	-61,81	-18,81	-13,13	-8,21	-3,91	6,00	10,52	14,24	17,37				
8%																					
Trad	1 293,49	1 293,92	1 294,37	1 294,81	1 295,25	1 344,55	1 377,65	1 411,20	1 444,65	2 032,62	2 175,74	2 318,87	2 462,00	3 058,19	3 370,40	3 682,60	3 994,78				
Avancée	2 657,10	2 657,23	2 657,36	2 657,49	2 657,62	2 686,87	2 702,40	2 718,30	2 734,12	2 915,34	2 972,38	3 029,43	3 086,49	3 410,99	3 563,40	3 715,80	3 868,25				
Diff	-1 363,61	-1 365,31	-1 365,99	-1 366,68	-1 367,37	-1 342,32	-1 324,80	-1 307,10	-1 289,47	-882,72	-796,64	-710,56	-624,49	-352,80	-193,00	-33,20	126,53				
%	-105,42	-105,36	-105,30	-105,24	-105,18	-99,83	-96,17	-92,62	-89,26	-43,43	-36,61	-30,64	-25,37	-11,54	-5,73	-0,90	3,17				
10%																					
Trad	1 104,99	1 105,28	1 105,57	1 105,85	1 106,14	1 143,88	1 163,40	1 183,10	1 202,84	1 645,06	1 750,88	1 856,70	1 962,53	2 461,82	2 707,00	2 952,20	3 197,35				
Avancée	2 608,40	2 608,47	2 608,54	2 608,62	2 608,69	2 632,24	2 640,70	2 649,50	2 657,67	2 783,87	2 827,48	2 871,08	2 914,69	3 206,92	3 334,60	3 462,30	3 590,02				
Diff	-1 503,41	-1 503,19	-1 502,97	-1 502,77	-1 502,55	-1 488,46	-1 477,30	-1 466,40	-1 454,83	-1 138,81	-1 076,60	-1 014,38	-952,16	-745,10	-627,60	-510,10	-392,67				
%	-136,06	-136,00	-135,95	-135,89	-135,84	-130,12	-126,98	-123,95	-120,95	-69,23	-61,49	-54,63	-48,52	-30,27	-23,18	-17,28	-12,28				

Résultats pour l'option de scellement de fissures

Pour une durée de vie de 40 ans et un TMJA de 40 000 et 60 000, uniquement

Trad-scell = Scellement sur chaussée traditionnelle

Revêtement traditionnel avec option de scellement de fissures

Chaussée avancée = 3 fois plus coûteuse que la chaussée traditionnelle, durée de vie 40 ans

Trafic (AADT)		40 000				60 000			
Poids lourds		5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%
Taux d'act. 3%	Trad-scell	1 822.84	1 826.60	1 830.35	1 834.12	1 997.82	2 183.42	2 389.85	2 596.30
	Avancée	1 931.06	1 931.72	1 932.38	1 933.04	2 019.56	2 109.59	2 201.55	2 293.49
	Diff	-108.22	-105.12	-102.03	-98.92	-21.74	73.83	188.30	302.81
	%	-5.9	-5.8	-5.6	-5.4	-1.1	3.4	7.9	11.7
6%	Trad-scell	1 237.89	1 239.25	1 240.55	1 241.89	1 312.35	1 374.81	1 443.90	1 512.99
	Avancée	1 744.55	1 744.80	1 745.04	1 745.29	1 786.24	1 816.75	1 847.88	1 879.01
	Diff	-506.66	-505.55	-504.49	-503.40	-473.89	-441.94	-403.98	-366.02
	%	-40.9	-40.8	-40.7	-40.5	-36.1	-32.1	-28.0	-24.2
8%	Trad-scell	1 034.44	1 035.18	1 035.88	1 036.60	1 083.48	1 115.89	1 151.41	1 186.95
	Avancée	1 678.25	1 678.38	1 678.51	1 678.64	1 708.02	1 723.57	1 739.42	1 755.27
	Diff	-643.81	-643.20	-642.63	-642.04	-624.54	-607.68	-588.01	-568.32
	%	-62.2	-62.1	-62.0	-61.9	-57.6	-54.5	-51.1	-47.9
10%	Trad-scell	906.65	907.07	907.48	907.90	942.98	960.90	980.32	999.78
	Avancée	1 637.75	1 637.82	1 637.89	1 637.97	1 661.69	1 670.04	1 678.53	1 687.02
	Diff	-731.10	-730.75	-730.41	-730.07	-718.71	-709.14	-698.21	-687.24
	%	-80.6	-80.6	-80.5	-80.4	-76.2	-73.8	-71.2	-68.7

*Annexe E***Évaluation économique des chaussées à longue durée de vie : phase I****Membres du groupe de travail****AUSTRALIE**

Anthony OCKWELL
Department of Transport and Regional
Services

BELGIQUE

Ann VANELSTRAETE
Belgium Road Research Centre

CANADA

Michael F. OLIVER
Ministry of Transportation, Canada

DANEMARK

Jørgen CHRISTENSEN (Président)
Danish Road Institute

Finn THOEGERSEN
Danish Road Institute

ÉTATS-UNIS

Jack YOUTCHEFF
Federal Highway Administration, Turner-
Fairbank Highway Research Center

FINLANDE

Heikki JAMSA
Finnish Asphalt Association

FRANCE

Nicole COUTANT
LCPC

Jean-Michel PIAU
LCPC

Patrice RETOUR
LCPC

HONGRIE

Andras GULYAS
Technical and Information Services
on National Roads

HONGRIE

István SZARKA
Technical and Information State Services on
National Roads

NORVÈGE

Sverre DIGERNES
Norwegian Public Roads Administration

PAYS-BAS

Govert SWEERE
Ministry of Transport, Public Works and Water
Management

J.J. VAN DER VUSSE

Ministry of Transport, Public Works and Water
Management

POLOGNE

Włodzimierz SUPERNAK
General Directorate for National Roads and
Motorways

ROYAUME-UNI

Wyn LLOYD
United Kingdom Highways Agency

SUÈDE

Safwat SAID
Swedish National Road and Transport Research
Institute (VTI)

SUISSE

Markus CAPREZ
Swiss Federal Institute of Technology (ETH)

SECRÉTARIAT DE L'OCDE

Ceallach LEVINS
John WHITE

GLOSSAIRE

Couches structurelles – Les couches de chaussée forment une combinaison de couches de matériaux construites au-dessus du sol de fondation ou de la roche, afin d’assurer une structure acceptable sur laquelle les véhicules pourront circuler. Les couches structurelles comprennent habituellement une couche de roulement, une couche de liaison, une couche de base et une couche de fondation.

Couche de roulement – Couche supérieure de la structure de la chaussée assurant une surface de roulement aux véhicules. Elle est conçue pour être résistante à l’orniérage, à l’érosion, à la fissuration thermique et à l’usure. Elle demande un entretien et un remplacement périodiques, tandis que les couches structurelles inférieures doivent être considérées comme des couches de chaussée permanentes ou à longue durée de vie, nécessitant peu ou pas d’entretien.

Couche de roulement avancée – Couche de roulement constituée de matériaux de haute technologie aux propriétés nécessaires pour permettre une amélioration sensible de la durabilité et une augmentation sensible de la durée de vie prévue, jusqu’à peut-être 30 ans, voire plus.

Couche de base – Couche de matériaux déterminés et sélectionnés, d’une épaisseur choisie, placée immédiatement sous les matériaux de surface et construite sur le sol ou les matériaux de fondation, afin d’augmenter la capacité structurelle, de répartir les charges, d’assurer le drainage ou de réduire l’action du gel. Les matériaux de la couche de base peuvent être des matériaux granulaires, bitumineux ou hydrauliques.

Couche de base en matériau non traité – Granulat concassé, utilisé comme matériau de couche de base.

Couche de fondation – Couche de matériaux granulaires sélectionnés et compactés, placés dans la structure de la chaussée, sur le sol de fondation et sous les matériaux de la couche de base.

Sol de fondation – Ensemble des terrassements réalisés dans le périmètre de la route, avant la construction de la couche de fondation granulaire et de la couche de base ou autres couches de chaussée. Le sol de fondation est constitué des matériaux de la plate-forme en place et de tous matériaux de remblai.

Épaisseur équivalente – Terme de dimensionnement structurel utilisé pour mesurer approximativement l’épaisseur relative de chaque couche structurelle en termes d’épaisseur équivalente. C’est une équivalence structurelle, égale à environ deux fois l’épaisseur d’enrobé plus l’épaisseur totale des couches granulaires inférieures.

Liant hydrocarboné – Ciment bitumineux brun sombre ou noir, dont les principaux constituants sont des bitumes, produits de la nature ou résidus de la distillation du pétrole et utilisés comme liants dans les enrobés bitumineux.

Granulat – Matériau minéral dur et inerte, comprenant les graves, sables, pierres concassées et les matériaux recyclés.

Indice de rugosité international (IRI) – Mesure de l’uni d’une chaussée, fondée sur le profil en long de la surface de la chaussée, tel que défini par la fiche technique n° 46 de la Banque mondiale intitulée « Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements ».

Types de mélanges

Béton bitumineux (BB) – Mélange contrôlé de grande qualité, composé de granulat et de liant bitumineux, réalisé à chaud dans une centrale d’enrobage, mis en œuvre sur la route à l’aide d’un finisseur et compacté pour assurer les bonnes performances de la chaussée. Il peut s’agir d’un asphalte coulé gravillonné, d’un béton bitumineux semi-grenu ou d’un enrobé drainant.

Enrobé dense (ED) – Mélange formulé de grande qualité, couramment utilisé et comprenant un matériau bien calibré (distribution égale des tailles de particules dans le mélange), de graves, de sable et de fines d’apport, qui permet d’obtenir une bonne densité et imperméabilité et un bon maintien du squelette minéral.

Asphalte coulé gravillonné (SMA) – Béton bitumineux contenant un mélange particulièrement résistant à l’orniérage, à l’aide de matériaux de grande qualité. Les granulats sont généralement cubiques et sont constitués de pierres concassées, dures et résistantes à l’abrasion. Ce mélange comprend des graves à granulométrie discontinue, des fines d’apport et des adjuvants tels que les fibres. La matrice peut être obtenue à l’aide de bitume modifié aux polymères ou de bitume non modifié, relativement rigide. Ce type de mélange est très utile en zone urbaine à fort trafic de poids lourds. Il présente une ossature de pierre, avec mise en contact des particules de pierre, satisfaisant aux principales exigences en matière de portance. Cette matrice apporte une rigidité supplémentaire au mélange et est constituée de fibres, de fines d’apport et d’un liant modifié aux polymères ou d’un liant non modifié, relativement rigide. De nombreux gestionnaires ont l’expérience de ce type de mélange et l’utilisent, dans les pays européens, de façon courante.

Superpave – Type de mélange résistant à l’orniérage, à haute teneur en granulats, présentant une capacité de portance par mise en contact des particules de pierre, similaire à celle de l’asphalte coulé gravillonné, mais contenant généralement un granulat à granulométrie plus large et sans fibre. C’est un type d’enrobé à chaud, pour « chaussée à hautes performances », dérivé du programme américain de recherche routière SHRP. Il est durable, résistant à l’orniérage et comprend des granulats déterminés, de qualité spécifique. Il est réalisé à l’aide de méthodes de sélection de bitumes déterminées et d’une méthode de formulation des mélanges de qualité élevée, utilisant des protocoles et des équipements normalisés.

Béton bitumineux drainant (BBDR) – Également appelé enrobé drainant, ce mélange est couramment utilisé dans tous les pays de l’OCDE, mais plus particulièrement dans les pays européens. C’est un type d’enrobé à granulométrie discontinue, perméable, à teneur élevée en vides. Il est utilisé pour réduire le bruit et les projections d’eau tout en satisfaisant aux exigences de frottement. Les chaussées revêtues de béton bitumineux drainant nécessitent un traitement important des granulats et une attention particulière portée à la teneur en bitume et aux détails de construction.

Les **autres types de mélanges** cités par les agences de l'OCDE sont les types de mélanges normalisés, utilisés depuis longtemps avec succès. Ils ont été désignés par ces agences sous les noms d'enrobés à granulométrie continue, de revêtements à granulométrie continue, de classe 1, d'enrobés à granulométrie grossière, moyenne ou fine. On les appellera simplement bétons bitumineux. Ils doivent être considérés comme des types d'enrobés de travail, utilisés depuis de nombreuses années par les gestionnaires et composés généralement d'un liant normalisé simple (non modifié) et d'un granulat bien calibré.

Entretien, remise en état et fin de la durée de vie de la chaussée

Entretien – Les activités d'entretien sont des opérations permettant de maintenir l'intégrité de la surface en matière d'uni, de dégradation, d'orniérage, d'adhérence et d'apparence, sans augmenter nécessairement la résistance structurelle de la chaussée. Les traitements d'entretien courant comprennent le scellement des fissures, la réparation des nids-de-poule, les emplois partiels, la réparation des épaufrures, la réparation des dalles, le scellement des fissures et des joints, la pose de films d'étanchéité, le déflachage et les améliorations apportées au drainage. Les opérations d'entretien plus lourdes comprennent les emplois partiels plus importants, la scarification, la régénération, la réparation des dalles avec transfert de charges, la mise en œuvre de béton bitumineux clouté ou de coulis bitumineux et le micro-resurfaçage. L'entretien permet d'allonger la durée de vie des chaussées de quelques années, entre 2 et 5 ans généralement, voire jusqu'à environ 12 ans. En ce qui concerne la couche de roulement de la chaussée, l'entretien ne signifie pas la fin de sa durée de vie.

Remise en état – Les activités de remise en état sont les opérations d'entretien nécessaires pour renouveler ou allonger la durée de vie de la chaussée lorsque la rugosité, le manque d'intégrité structurelle ou les dégradations superficielles excessives rendent la chaussée inacceptable en termes de niveau de service, de coûts pour l'utilisateur et de sécurité. La remise en état peut servir également à renforcer une chaussée existante. Elle est nécessaire lorsque les techniques d'entretien ne permettent plus de maintenir la chaussée dans un état acceptable, de manière rentable. Les opérations de remise en état sont généralement plus coûteuses que les opérations d'entretien. Après une remise en état, l'état de la route devrait être considéré comme similaire ou proche à celui de la route après sa construction initiale. Les techniques de remise en état comprennent le rechargement ou le resurfaçage, le fraisage et le remplacement ou le resurfaçage, le recyclage à chaud sur place, le recyclage à froid sur place, la reconstruction et le retraitement. En ce qui concerne la couche de roulement de la chaussée, la remise en état signifie la fin de sa durée de vie et le début d'un nouveau cycle de vie.

Fin de la durée de vie – Pour la couche de roulement, la fin de la durée de vie se produit lorsque la couche superficielle est remise en état, remplacée, retirée, fraisée ou rechargée.

Durée de vie de conception – Durée de vie structurelle de conception, utilisée à des fins de dimensionnement. Elle concerne l'ensemble de la structure de la chaussée, composée des couches de fondation, de base et de surface.

Durée de vie prévue – Durée de vie, en années, de la couche de surface avant remise en état. La durée de vie prévue est basée sur des données empiriques ou sur l'expérience des agences concernées.

Chaussée à longue durée de vie – Chaussée structurelle conservant sa capacité structurelle et sa résistance dans le temps. La résistance à la charge et la durabilité sont assurées par une série de couches. En théorie, pour les chaussées bitumineuses, la couche de bitume inférieure assure une grande résistance à la fatigue, la couche intermédiaire assure la résistance à l'orniérage et la couche supérieure assure une surface de roulement durable. La couche de roulement présente les caractéristiques nécessaires en matière d'adhérence, de durabilité et de bruit. Avec une augmentation de l'épaisseur des couches de bitume, la chaussée devrait être conçue pour éviter l'orniérage et la fissuration par fatigue, et atteindre, à l'aide d'un entretien périodique ou du remplacement de la couche de roulement, une longue durée de vie.

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
(77 2005 01 2 P) ISBN 92-64-00857-8 – n° 53958 2005