



CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

DES CHAUSSÉES À LONGUE DURÉE DE VIE POUR ROUTES À FORTE CIRCULATION





DES CHAUSSÉES À LONGUE DURÉE DE VIE POUR ROUTES À FORTE CIRCULATION

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 :

Long-Life Surfaces for Busy Roads

Les corrigenda des publications de l'OCDE sont disponibles sur : www.oecd.org/editions/corrigenda.

© OCDE/FIT 2008

L'OCDE autorise à titre gracieux toute reproduction de cette publication à usage personnel, non commercial. L'autorisation de photocopier partie de cette publication à des fins publiques ou commerciales peut être obtenue du Copyright Clearance Center (CCC) info@copyright.com ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) contact@cfcopies.com. Dans tous ces cas, la notice de copyright et autres légendes concernant la propriété intellectuelle doivent être conservées dans leur forme d'origine. Toute demande pour usage public ou commercial de cette publication ou pour traduction doit être adressée à rights@oecd.org.

FORUM INTERNATIONAL DES TRANSPORTS

Le Forum International des Transports a été créé par une Déclaration du Conseil des Ministres de la CEMT (Conférence Européenne des Ministres des Transports) lors de la session ministérielle tenue à Dublin les 17 et 18 mai 2006. Il résulte de la volonté des Ministres de transformer la CEMT en un forum international ayant notamment pour objectif d'aider les responsables politiques et un public plus large à mieux appréhender le rôle des transports en tant qu'élément clé de la croissance économique, ainsi que leurs effets sur les composantes sociales et environnementales du développement durable.

Établi sur la base juridique du Protocole de la CEMT signé à Bruxelles le 17 octobre 1953 ainsi que des instruments juridiques appropriés de l'OCDE, le Forum constitue une entité internationale bénéficiant des structures d'appui et des mécanismes de financement nécessaires. Son siège administratif est fixé à Paris.

Le Forum International des Transports a une dimension mondiale et un caractère global. Les sujets qui y sont traités sont de nature stratégique et d'une envergure globale. Ils peuvent concerner tous les modes de transport. Le Forum International des Transports est avant tout un lieu de discussion et de négociation.

Les pays membres à part entière et les pays membres associés de la CEMT sont les *membres fondateurs* du Forum. Il s'agit des pays suivants : Albanie, Allemagne, Arménie, Australie, Autriche, Azerbaïdjan, Bélarus, Belgique, Bosnie-Herzégovine, Bulgarie, Canada, Corée, Croatie, Danemark, ERY Macédoine, Espagne, Estonie, États-Unis, Finlande, France, Géorgie, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Japon, Lettonie, Liechtenstein, Lituanie, Luxembourg, Malte, Mexique, Moldavie, Monténégro, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Russie, Serbie, Slovaquie, Slovénie, Suède, Suisse, Turquie, Ukraine. Le Maroc bénéficie d'un statut d'*observateur*. Des entreprises, organisations, institutions ou personnalités éminentes de la société civile peuvent être invitées à conclure avec le Forum un *partenariat*.

Le Forum International des Transports organise une Conférence annuelle à laquelle participent aussi bien des Ministres que des personnalités éminentes de la société civile et des représentants d'organismes concernés par la politique des transports. À partir de 2008, cette réunion aura lieu chaque année à Leipzig en Allemagne. Le thème retenu pour 2008 est le suivant : « Énergie et transport - Le défi du changement climatique ». La session de 2009 sera consacrée à « La mondialisation des échanges et son impact sur les transports et les infrastructures ».

Avec l'OCDE, un Centre conjoint de Recherche sur les Transports a été établi en 2004. Ce Centre mène des programmes de recherche coopératifs couvrant tous les modes de transport, recherches qui soutiennent la formulation des politiques dans les pays membres. À travers certains de ses travaux, le Centre apporte également des contributions aux activités du Forum International des Transports.

AVANT-PROPOS

Dans la plupart des pays, le réseau routier constitue l'un des patrimoines communs les plus importants et appartient essentiellement à l'État. Les administrations routières doivent entretenir, exploiter, améliorer, remplacer et préserver ce patrimoine tout en gérant avec soin les ressources financières et humaines limitées qui doivent servir à réaliser ces objectifs.

Le maintien de revêtements sûrs, confortables et durables sur les autoroutes et routes principales à fort trafic représente depuis longtemps un défi majeur pour les maîtres d'ouvrage et les équipes opérationnelles, qui gèrent la construction et l'entretien des routes.

La question de l'allongement de la durée de service des chaussées routières est une préoccupation essentielle du secteur depuis plus d'une décennie, annoncée par l'apparition du terme « chaussées à longue durée de vie », par opposition au terme « chaussées durables », qui a été synonyme de performances satisfaisantes pendant de nombreuses années.

Les « *chaussées à longue durée de vie* » semblent particulièrement souhaitables sur les routes à fort trafic, pour éviter les coûts des opérations d'entretien, qui incluent les coûts des retards occasionnés aux usagers, notamment en cas d'encombrement de la circulation.

Il est admis que les couches structurelles, sous-jacentes, des chaussées peuvent atteindre les objectifs de longévité fixés. C'est pourquoi la présente étude porte sur les couches de surface ou couches de roulement.

Cette deuxième phase du projet d'évaluation économique des chaussées à longue durée de vie a eu pour objectif de renforcer nos connaissances sur le potentiel et les limitations des deux éventuels matériaux candidats, sélectionnés en phase I pour faire l'objet de recherches ultérieures sur des couches de roulement innovantes, à longue durée de vie : le *bitume-époxy* et l'*enduit hydraulique fibré gravillonné*.

Le rapport intitulé *Revêtements à longue durée de vie pour routes à fort trafic* est le fruit de plus de deux ans de travail réalisé par un groupe de chercheurs spécialisés dans le domaine des chaussées routières, venant de nombreux pays de l'OCDE et du FIT. Il a été rédigé sous l'égide du Centre conjoint OCDE/FIT de recherche sur les transports.

REMERCIEMENTS

Le projet a bénéficié du soutien des administrations routières nationales et de leurs chercheurs, dans de nombreux pays.

La tâche du groupe de travail a été considérablement facilitée par les organismes qui ont généreusement accueilli et organisé plusieurs réunions à l'appui du projet, ainsi que par les nombreuses personnes qui ont apporté leur expertise.

Le groupe de travail souhaite remercier chaleureusement les organismes suivants, notamment pour leurs contributions majeures au projet dans son ensemble, ainsi que pour leur financement et leur soutien apportés aux essais en laboratoire, réalisés dans leurs pays :

Organisme	Pays
Federal Highway Research Institute (BAST)	Allemagne
New South Wales Roads and Traffic Authority (NSW RTA)	Australie
Vejdirektoratet (VD)	Danemark
DBT Engineering (DBT)	Danemark
Turner Fairbank Highway Research Center (TFHRC)	États-Unis
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)	France
Transit New Zealand (TNZ)	Nouvelle-Zélande
Transport Research Laboratory (TRL) Ltd	
United Kingdom Highways Agency (UK-HA)	Royaume-Uni
Derzhavnyi dorozhnii NDI (DerzhdorNDI)	Ukraine

RÉSUMÉ ANALYTIQUE NUMÉRO ITRD* F111481

Bien que des recherches récentes aient permis d'améliorer sensiblement la durabilité des couches structurelles des chaussées routières, les couches de surface supportent difficilement l'augmentation des charges et de la densité de trafic. Les fermetures fréquentes de routes à des fins de réparation et de remise en état constituent un problème croissant pour les administrations routières et les usagers, en raison de leurs coûts, des restrictions d'accès qu'elles imposent, des encombrements et des perturbations qu'elles causent sur les flux de circulation, ainsi que des temps d'attente et des coûts qu'elles occasionnent aux usagers.

Dans ces circonstances, les chaussées à longue durée de vie, revêtues de matériaux avancés, ont beaucoup à offrir, notamment si elles peuvent afficher des performances optimales sans exiger de réparations majeures pendant plus de 30 ans. Sur les routes à forte circulation, les recherches ont montré que, dans ce contexte, les avantages apportés par l'absence de réparations et de remises en état importantes peuvent être suffisamment grands pour justifier les coûts initiaux élevés de ces revêtements de chaussées avancés.

Le présent rapport a été réalisé par un groupe d'experts, composé de représentants de 18 pays, qui ont étudié et testé le bitume-époxy et l'enduit hydraulique fibré gravillonné (EHFG) pour leur utilisation sur des revêtements de chaussées avancés.

Le rapport décrit les essais réalisés pendant plus de deux ans dans les laboratoires nationaux de huit pays de l'OCDE et de la FIT : Allemagne, Australie, Danemark, États-Unis, France, Nouvelle-Zélande, Royaume-Uni et Ukraine. Il donne les résultats des essais, évalue les performances des matériaux en fonction des principaux indicateurs de longévité, indique les recherches ultérieures à effectuer et les questions relatives à la construction, compare les coûts indicatifs avec ceux des matériaux traditionnels (de référence) et tire les conclusions sur une éventuelle utilisation de ces matériaux de revêtements avancés sur les routes à forte circulation. Enfin, il formule des recommandations pour la prochaine étape des travaux et propose des essais de matériaux sur le terrain.

Classification du sujet : Conception des chaussées (23) ; liants et matériaux bitumineux (31) ; béton (32) ; autres matériaux utilisés dans les couches de roulement (33).

Mots clés : Enrobé, calcul économique, durabilité, économie des transports, résine époxyde, chaussée souple, béton hautes performances, cycle de vie, long terme, route à grande circulation, autoroutes, OCDE, calcul des chaussées, chaussée rigide, revêtement (chaussée), couche de roulement

* La base de données de la documentation internationale de recherche sur les transports (ITRD) contenant les informations publiées sur les transports et la recherche en matière de transports est gérée par la société TRL, au nom du Centre conjoint OCDE/FIT de recherche sur les transports. L'ITRD contient plus de 350 000 références bibliographiques et est enrichie chaque année de près de 10 000 références supplémentaires. Elle est alimentée par plus de 30 instituts et organismes de renom, à travers le monde. Pour plus d'informations sur l'ITRD, veuillez écrire à itrd@trl.co.uk ou visiter le site Web www.itrd.org

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	5
REMERCIEMENTS	7
MESSAGES CLÉS	11
RÉSUMÉ	15
1. ANTÉCÉDENTS ET CONTEXTE	33
1.1 Antécédents	33
1.2 Contexte des couches de roulement à longue durée de vie	33
1.3 Coûts sur la durée de vie	35
2. PRINCIPALES CONCLUSIONS DE L'ÉTUDE DE PHASE I	37
2.1 Vue d'ensemble	37
2.2 Conclusions économiques – Rapport de phase I sur les chaussées à longue durée de vie	37
2.3 Étude de phase II	41
3. MANDAT, CHAMP ET ORGANISATION DES TRAVAUX	43
3.1 Mandat	43
3.2 Champ de l'étude de phase II	43
3.3 Organisation de l'étude	45
4. BITUME-ÉPOXY : RÉALISATION ET RÉSULTATS DES ESSAIS	47
4.1 Introduction	47
4.2 Sélection du matériau	48
4.3 Propriétés du liant	50
4.4 Propriétés du mélange	53
4.5 Essais composites	58
4.6 Essais de fragilisation	65
4.7 Essais de chaussée accélérés	66
4.8 Évaluation des caractéristiques de surface	69
4.9 Essais divers	71
4.10 Résumé et conclusions	72
5. ENDUIT HYDRAULIQUE FIBRÉ GRAVILLONNÉ : RÉALISATION ET RÉSULTATS DES ESSAIS	77
5.1 Introduction : un matériau hydraulique innovant pour couches de roulement.....	77
5.2 Choix des constituants	78
5.3 Formulation, fabrication et caractérisation du mortier (LCPC, France)	79
5.4 Essais de retrait (LCPC, France)	82

5.5	Détermination du coefficient de dilatation thermique (FHWA, États-Unis)	84
5.6	Procédures de préparation du bitume et de mise en œuvre de l'enduit hydraulique fibré gravillonné	86
5.7	Essais de fissuration sur planches (LCPC, France).....	88
5.8	Essais de fissuration par retrait empêché et élongation imposée (DBT, Danemark) ...	91
5.9	Essais de fissuration en vraie grandeur (NSW RTA, Australie).....	94
5.10	Essais préliminaires de décappage (LCPC, France)	98
5.11	Essais au tribomètre (LCPC, France)	100
5.12	Essais d'abrasion (FHWA, États-Unis)	102
5.13	Essais de gel-dégel (VD, Danemark)	105
5.14	Essais d'abrasion combinés acide et gel-dégel (BASt, Allemagne).....	106
5.15	Essais de fatigue (DBT, Danemark)	109
5.16	Essais de fatigue en vraie grandeur (TRL, Royaume-Uni)	111
5.17	Évaluation du bruit (BASt, Allemagne)	115
5.18	Évaluation des risques de délamination et de flambement (DBT, Danemark ; LCPC, France)	117
5.19	Conclusions préliminaires	118
6.	ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET EXTRAPOLATION DES RÉSULTATS	123
6.1	Introduction	123
6.2	Bitume-époxy	123
6.3	Enduit hydraulique fibré gravillonné	130
7.	RECHERCHES ET ESSAIS ULTÉRIEURS	137
7.1	Introduction	137
7.2	Questions communes aux deux matériaux	137
7.3	Bitume-époxy	139
7.4	Enduit hydraulique fibré gravillonné	141
7.5	Besoins de recherche immédiats	143
8.	QUESTIONS RELATIVES À LA CONSTRUCTION, ASPECTS ÉCONOMIQUES ET ÉVALUATION DES RISQUES	145
8.1	Introduction	145
8.2	Couches de roulement en bitume-époxy.....	145
8.3	Couches de roulement en enduit hydraulique fibré gravillonné.....	151
8.4	Comparaison des estimations de coûts – Couches de roulement en bitume-époxy et en enduit hydraulique fibré gravillonné.....	155
9.	ESSAIS DE PHASE III	159
9.1	Prochaine étape dans le processus d'innovation	159
9.2	Cadre d'essais coordonnés.....	160
9.3	Opportunités de programmes	160
9.4	Objectifs	160
9.5	Calendrier	163
9.6	Organisation hôte	164
10.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	167
10.1	Contexte	167
10.2	Rapport de phase I.....	167
10.3	Travaux de phase II - Conclusions	168
10.4	Bitume-époxy	168

10.5	Enduit hydraulique fibré gravillonné (EHFG)	170
10.6	Résumé des conclusions de l'étude	173
10.7	Recommandations pour les essais de phase III	175

APPENDICES

APPENDICE A.1 :	Historique de performances enregistrées en laboratoire et sur le terrain pour les matériaux de référence Américains et Néo-Zélandais	179
APPENDICE A.2 :	Recommandations du fabricant concernant les bitumes époxy acide	181
APPENDICE A.3 :	Méthodes d'évaluation des caractéristiques de prise	182
APPENDICE A.4 :	Propriétés rhéologiques du liant à différentes étapes de vieillissement	183
APPENDICE A.5 :	Propriétés de l'enrobé	185
APPENDICE B :	Besoins généraux à long terme en matière d'étude des chaussées	197
APPENDICE C :	Rapports d'essais en laboratoire publiés sur le site web du centre conjoint de recherche sur les transports	199

ANNEXES

ANNEXE A :	Liste des abréviations	201
ANNEXE B :	Liste des membres du groupe de travail	203

MESSAGES CLÉS

Revêtements à longue durée de vie pour routes à fort trafic

Le maintien de revêtements sûrs, confortables et durables sur les autoroutes et routes principales à fort trafic représente depuis longtemps un défi majeur pour les maîtres d'ouvrage et les équipes opérationnelles qui gèrent la construction et l'entretien des routes.

Les « *chaussées à longue durée de vie* » semblent particulièrement souhaitables sur les routes à fort trafic, pour éviter les coûts des opérations d'entretien qui incluent les coûts des retards occasionnés aux usagers, notamment en cas d'encombrement de la circulation. Il est admis que les couches structurelles, sous-jacentes, des chaussées peuvent atteindre les objectifs de longévité fixés. C'est pourquoi la présente étude porte sur les couches de surface ou couches de roulement des chaussées routières.

Prenant en compte les réductions potentielles des coûts pour les usagers, le rapport de Phase I a conclu que : « *...un revêtement de chaussée à longue durée de vie environ 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.* »

Matériaux candidats pour un revêtement à longue durée de vie

Dans la phase actuelle, les deux éventuels matériaux candidats qui ont été sélectionnés, le *bitume-époxy* et l'*enduit hydraulique fibré gravillonné (EHFG)*, ont été étudiés et testés par les laboratoires nationaux des pays participant activement aux travaux.

Bitume-époxy

Le bitume-époxy a déjà démontré sa capacité à assurer une durée de service de 40 ans, en tant que revêtement routier sur tabliers de ponts en acier. Les essais réalisés au cours du présent projet ont porté sur le potentiel de longévité du matériau sur les corps de chaussées routières plus souples que les tabliers de ponts rigides.

Les nombreux essais réalisés ont indiqué que le bitume-époxy devrait constituer un matériau durable, d'une grande longévité, adapté à une utilisation sur routes à fort trafic. Ils ont confirmé que le bitume-époxy était un excellent matériau présentant de meilleures performances que les liants traditionnels, sur les principaux indicateurs suggérant une longue durée de service.

Les difficultés de construction liées à ce matériau semblent modérées, puisque les centrales et les équipements actuels peuvent être utilisés. Cependant, le durcissement du matériau en cas de retard dans la construction augmente le risque de défauts de construction et d'endommagement de la centrale. Il sera également important de déterminer à quel moment la réaction de polymérisation est achevée, après

le mélange du bitume-époxy, compte tenu des effets du liant bitume-époxy non polymérisé sur la santé qui ont entraîné des limitations d'utilisation dans certains pays.

En conclusion, au vu de ses performances, le revêtement de bitume-époxy est prêt pour les démonstrations sur route, à grande échelle.

Enduit hydraulique fibré gravillonné

La couche de roulement en EHFG testée est un système innovant, développé au cours du projet. Elle est constituée d'une mince couche de mortier fin fibré, à ultra hautes performances, dans laquelle sont enchâssées des particules dures de granulats, résistant au polissage, pour former une couche composite de 10 mm d'épaisseur. L'objectif a été d'évaluer les possibilités d'utilisation de cette couche de roulement ultra-mince en EHFG.

Les essais ont montré que l'EHFG avait une résistance et une intégrité élevées. Au vu des résultats, il est très probable que les couches de roulement en EHFG puissent avoir une durée de service de 30 ans, sans nécessiter pratiquement aucun entretien, même sur routes à forte circulation.

La production de l'EHFG semble possible avec le savoir-faire et les équipements actuels. Cependant, certaines modifications des équipements existants ou le développement d'un nouvel équipement seront nécessaires pour mettre en œuvre le mortier d'EHFG et insérer les gravillons. D'autres essais de terrain seront également nécessaires pour obtenir le meilleur équilibre possible entre malaxage/transport/mise en œuvre et performances du matériau durci. Une fois ces essais réalisés, il est probable que le produit EHFG final se caractérise par une sécurité, un confort et une durabilité élevés, ainsi qu'un bruit limité. Au vu de ses performances, il sera également prêt pour les démonstrations de terrain.

Comparaison des coûts indicatifs

Les coûts relatifs aux revêtements traditionnels (de référence) seront d'une importance capitale pour évaluer la viabilité économique. Pour le bitume-époxy, la différence de coût peut être estimée avec une certaine marge de confiance. Pour l'enduit hydraulique fibré gravillonné, les coûts des matériaux, du malaxage et du transport peuvent être extrapolés à partir de la pratique actuelle, mais la différence de coût de la mise en œuvre dépendra de la nécessité de modifier les équipements existants ou de développer un nouvel équipement.

Les coûts indicatifs fournis pour le bitume-époxy et l'enduit hydraulique fibré gravillonné suggèrent qu'en Europe de l'Ouest ces revêtements pourraient être deux à trois fois plus chers que les traitements traditionnels.

Bien que ces estimations ne soient qu'indicatives, la différence de coût pour les couches de roulement en bitume-époxy et en enduit hydraulique fibré gravillonné, par rapport aux revêtements traditionnels (de référence) est probablement moins importante qu'initialement prévu. Cela est dû, d'une part, à une meilleure compréhension des coûts et des procédures de production et, d'autre part, à l'augmentation significative du coût des revêtements bitumineux traditionnels, observée ces dernières années, notamment en Europe de l'Ouest.

Dans ce contexte, on peut raisonnablement penser que les revêtements à longue durée de vie seront rentables, dans la plupart des pays, sur les routes à forte circulation. Il appartient maintenant à chaque

pays d'envisager au cas par cas, à partir de ses données et de ses analyses, les conditions dans lesquelles ce revêtement avancé pourrait être utilisé.

Essais de terrain proposés

Des essais de terrain limités, en conditions de trafic, sur le réseau routier ou sur des voies privées, proposés dans le rapport, constituent logiquement la prochaine phase du projet. Comme toujours, les essais à grande échelle, sur de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques, comportent des risques. Cependant, on peut penser que des administrations routières, peut-être en partenariat avec les industriels, entreprendront cette nouvelle étape. Les recommandations formulées dans le rapport sont les suivantes :

- Réaliser des programmes d'essais de terrain coordonnés sur les revêtements de bitume-époxy et d'enduit hydraulique fibré gravillonné, commençant en 2009 et s'achevant en 2011, afin d'étudier le contrôle de la production, de la mise en œuvre et de la qualité, ainsi que les coûts, et de mettre en évidence les performances de ces revêtements en conditions réelles de trafic et d'environnement.
- Inviter les administrations routières intéressées à manifester leur souhait de participer aux essais proposés dès que possible après la publication du présent rapport.

RÉSUMÉ

R.1 Contexte

La maintenance de revêtements sûrs, confortables et durables sur les autoroutes à fort trafic représente depuis longtemps un défi majeur pour les maîtres d'ouvrage et les équipes opérationnelles, qui gèrent la construction et l'entretien des routes.

Les chaussées en béton rigide sont souvent choisies pour les routes à très fort trafic, car elles offrent une résistance et une durabilité élevées. Cependant, les exigences modernes en termes de confort et de réduction du bruit militent pour une macrotexture initiale limitée, qui peut entraîner une faible adhérence après dix à vingt ans de service.

Les chaussées semi-rigides permettent l'utilisation d'un revêtement souple sur un support rigide en matériaux traités aux liants hydrauliques, répondant aux exigences de portance d'une route à fort trafic. Cependant, elles requièrent des opérations d'entretien et de remise en état assez fréquentes, pour assurer la sécurité et le confort nécessaires, par exemple sur les autoroutes à fort trafic automobile circulant à des vitesses relativement élevées.

Les chaussées souples, dans lesquelles le revêtement et la couche de base sont composés de matériaux flexibles, traités aux liants bitumineux, constituent le troisième type de chaussées, probablement le plus courant, pour routes à forte circulation, malgré leurs problèmes inhérents de déformation et de fatigue sous des charges de trafic lourd.

Bien que des recherches récentes aient permis d'améliorer sensiblement la durabilité des couches structurelles des chaussées, les couches de surface supportent difficilement l'augmentation des charges et de la densité de trafic. Parallèlement, la demande de chaussées peu bruyantes vient s'opposer à l'objectif de durabilité, dans la mesure où ces types de revêtements tendent à réduire la durée de service. C'est pourquoi, les fermetures fréquentes de routes pour réparation et remise en état sont encore à l'ordre du jour et constituent un problème croissant, car elles contribuent de manière importante à l'augmentation des encombrements.

Les chaussées à longue durée de vie ont donc beaucoup à offrir sur les routes à forte circulation où les travaux sont de plus en plus difficiles, en raison des gênes et des temps d'attente qu'ils occasionnent aux usagers. Dans ces circonstances, les chaussées à longue durée de vie doivent afficher des performances optimales sans exiger de réparations majeures pendant plus de 30 ans. C'est également dans ce cadre que les avantages liés à l'absence de réparations et de remises en état importantes peuvent être suffisamment grands pour justifier les coûts initiaux élevés de ce type de chaussées.

R.2 Rapport de phase I

L'étude OCDE/CEMT intitulée « *Évaluation économique des chaussées à longue durée de vie – Phase I* » s'est achevée avec la publication du rapport de phase I, en 2005.

Le rapport de phase I a étudié la viabilité économique des revêtements à longue durée de vie et a sélectionné les éventuels matériaux candidats, en se concentrant sur les caractéristiques de performances et l'enveloppe de coûts exigée afin que ces nouveaux matériaux pour couches de roulement puissent être rentables.

R.2.1 Conclusions de la phase I

Le rapport de phase I a tiré les conclusions suivantes sur la viabilité économique¹ :

« Du point de vue du coût, un revêtement de chaussée à longue durée de vie environ 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 10 000), 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 atteindraient entre 1.8 million USD et 2.25 millions 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 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. »

Deux éventuels matériaux candidats, le bitume-époxy et l'enduit hydraulique fibré gravillonné (EHFG), ont été sélectionnés pour faire l'objet de recherches ultérieures sur des couches de roulement innovantes, à longue durée de vie.

R.3 Travaux de phase II - Conclusions

Le champ de l'étude de phase II, tel qu'approuvé par les ministres des Transports en 2004, est le suivant :

« Cette deuxième phase du projet assurera la coordination d'un nombre suffisant d'essais initiaux, réalisés dans des laboratoires nationaux, pour évaluer la durabilité des couches de roulement. Elle nécessitera des essais à petite échelle (essais en laboratoire et essais de charge accélérés) des matériaux les plus prometteurs. »

L'un des objectifs des travaux de phase II a été de renforcer nos connaissances actuelles sur le potentiel et les limitations des deux matériaux (*bitume-époxy et enduit hydraulique fibré gravillonné*) qui ont paru, à l'issue de la phase I, des candidats prometteurs.

Le groupe de travail créé pour réaliser la phase II de l'évaluation économique des chaussées à longue durée de vie, présidé par le Danemark, a compté 37 membres de 18 pays, ainsi que le secrétariat. Le présent rapport décrit et analyse les résultats de cette initiative majeure de recherche coordonnée. Un groupe plus restreint de membres et de pays ont mené les travaux de recherche. Neuf laboratoires nationaux de huit pays (Allemagne, Australie, Danemark, États-Unis, France, Nouvelle-Zélande, Ukraine et Royaume Uni) ont participé activement aux programmes d'essais sur les couches de roulement, dirigés par des coordinateurs techniques du centre de recherche routière Turner Fairbank de la Federal Highway Administration (États-Unis) et du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, France).

Chaque laboratoire participant aux essais sur le *bitume-époxy* a utilisé des matériaux locaux et des matériaux standard. Il a employé des procédures d'essai avancées (habituellement utilisées pour le dimensionnement des chaussées à fort trafic). Le revêtement de bitume-époxy a ainsi pu être comparé à une chaussée classique de référence (généralement avec liant modifié), à l'aide des mêmes essais et de la même formulation. Pour l'*enduit hydraulique fibré gravillonné*, chaque laboratoire participant a utilisé les mêmes constituants et les mêmes mélanges dans ses essais, afin d'obtenir une série de données cohérentes.

Il a été admis que les revêtements de bitume-époxy et d'enduit hydraulique fibré gravillonné devraient présenter d'excellentes propriétés fonctionnelles pour atteindre l'objectif d'une durée de service de 30 ans, pratiquement sans entretien. Pris dans leur ensemble, les essais ont fourni de précieuses informations sur la longévité potentielle des couches de roulement en bitume-époxy et en enduit hydraulique fibré gravillonné, soumises à des conditions réelles de trafic et d'environnement.

R.4 Bitume-époxy

Le bitume-époxy est un excellent matériau, employé depuis de nombreuses années comme revêtement routier sur tabliers de ponts rigides. Cette application, réalisée pour la première fois à San Francisco, continue de satisfaire aux exigences de performance, après 40 ans de service. Avec le temps, l'utilisation du bitume-époxy pour les tabliers de ponts rigides s'est développée dans un certain nombre de pays (elle s'est étendue depuis peu en Chine).

Les administrations routières n'utilisent pas le bitume-époxy pour les revêtements de chaussées routières ordinaires, car il existe des matériaux moins coûteux qui sont certes moins durables, mais qui peuvent à chaque fois être remplacés assez facilement et pour un coût modéré. Les travaux de phase II ont été l'occasion de tester les propriétés et l'intérêt du bitume-époxy dans ces environnements routiers.

Les nombreux essais réalisés sur le bitume-époxy à base d'acide, lors de ce projet, ont couvert toutes les questions importantes concernant les propriétés connues pour être déterminantes en matière de durabilité et de longévité d'une chaussée à fort trafic. Ils ont notamment été axés sur les caractéristiques de fatigue et de rupture, particulièrement importantes pour la durée de service. L'effet de l'oxydation sur les propriétés du liant et l'état du revêtement a également été considéré comme décisif.

R.4.1 Principales conclusions des essais de phase II sur le bitume-époxy

Au vu des vastes essais réalisés, il est apparu que les enrobés de bitume-époxy à base d'acide avaient des performances nettement supérieures à celles des enrobés classiques. Les bitumes époxy polymérisés sont, en particulier, comparés aux bitumes traditionnels, sensiblement :

- Plus rigides (module plus élevé) aux températures de service et dotés d'une meilleure capacité de répartition des charges.
- Plus résistants à l'orniérage.
- Plus résistants à l'amorçage et à la propagation de fissures, à basse température.
- Plus résistants à l'abrasion de surface due aux pneus, même après oxydation.
- Plus résistants à la fissuration par fatigue (même si les améliorations sont moins marquées à des niveaux de déformation élevés).
- Moins sensibles aux dommages dus à l'eau.
- Plus résistants à la dégradation oxydante, aux températures ambiantes.

Une série limitée d'essais de chaussée accélérés sur le béton bitumineux drainant (BBDR) époxy a montré des signes précoces d'abrasion de surface sur la section témoin, mais pas sur la section en époxy. Les sections soumises à des essais de chaussée accélérés ont indiqué que l'adhérence du bitume-époxy n'était pas sensiblement différente de celle d'un bitume traditionnel.

En résumé, les essais réalisés ont confirmé que le bitume-époxy était un excellent matériau, présentant de meilleures performances que les liants traditionnels. Les résultats des essais de bitumes époxy étudiés pendant cette phase se sont avérés nettement supérieurs à ceux des matériaux traditionnels, sur les principaux indicateurs permettant d'évaluer le potentiel de longévité.

R.4.2 Conclusions sur les performances attendues du bitume-époxy

Les performances attendues concernant la longévité et la durabilité des revêtements de bitume-époxy ont été établies pendant le projet, à partir des résultats des essais réalisés et de l'expérience de leur rapport à la longévité sur le terrain. Presque tous les essais ont indiqué que le bitume-époxy devrait constituer un revêtement durable, d'une grande longévité, même dans les situations routières où le trafic est le plus dense.

Il convient d'étudier avec attention le type de matériaux époxy à utiliser et de sélectionner les granulats avec soin, si l'on veut atteindre des performances optimales. Le bitume-époxy nécessite une surveillance étroite au moment de la fabrication et de la mise en œuvre, pour s'assurer que le mélange est bien réalisé et que les durées et les températures sont bien respectées, afin d'obtenir les meilleurs résultats.

Si tous les aspects du processus sont bien maîtrisés, le bitume-époxy pourrait donner un matériau de revêtement susceptible d'atteindre l'objectif d'une durée de vie sensiblement allongée, de 30 ans ou plus, pratiquement sans entretien.

R.4.3 Questions relatives aux recherches et essais ultérieurs sur le bitume-époxy

Les questions importantes à prendre en compte lors de recherches ultérieures sont les suivantes :

- *Durées de polymérisation et de construction.* De nouvelles études en laboratoire doivent être effectuées avant tout projet de démonstration pour optimiser le profil de polymérisation avec

la vitesse de réaction souhaitée en fonction des conditions locales (durée de polymérisation, distance de transport et mise en œuvre, etc.).

- *Délai de polymérisation.* Il est important d'établir à quel moment la réaction est achevée, après le mélange du bitume-époxy.
- *Température de polymérisation.* Il s'est avéré que certains systèmes époxy pouvaient prendre assez rapidement, à une température plus basse que prévu. Les perspectives d'une polymérisation à basse température (et par conséquent, les possibilités d'économie d'énergie et de réduction des coûts de production) doivent faire l'objet d'études plus poussées.

R.4.4 Questions relatives à la construction d'une couche d'enrobé au bitume-époxy

Le bitume-époxy est un matériau très rigide qui peut être appliqué en couches de surface minces. Les quantités produites, relativement faibles, ont presque toujours été fabriquées dans une centrale d'enrobage discontinue permettant de bien contrôler la durée de malaxage (importante pour les propriétés ultérieures de polymérisation et de post-polymérisation). Néanmoins, pour les essais réalisés en Nouvelle-Zélande, une centrale d'enrobage continue a été utilisée sans aucun problème.

En raison de la nature thermodurcissable du matériau, une attention particulière doit être portée à la durée des phases de production et de construction, afin que le produit ne prenne pas trop rapidement avant le compactage. Le risque de défauts de construction et d'endommagement de la centrale est plus élevé qu'avec un bitume traditionnel. Dans ces deux domaines, le risque perçu devrait diminuer avec l'expérience.

À l'état non polymérisé, certains matériaux époxy sont des composés hautement allergènes. Ceux-ci n'ont pas été utilisés parmi les bitumes époxy étudiés au cours du projet. Cependant, si ces matériaux devaient être employés, un équipement et des mesures de sécurité spécifiques seraient nécessaires pour toutes les personnes amenées à les manipuler avant la polymérisation.

R.5 Enduit hydraulique fibré gravillonné (EHFG)

L'enduit hydraulique fibré gravillonné (EHFG) est un produit innovant, développé et testé pour la première fois dans des applications de revêtements routiers, au cours du présent projet. Cette chaussée est constituée d'une mince couche de mortier fin fibré, à ultra hautes performances, dans laquelle sont enchâssées des particules dures de granulat, résistant au polissage, pour former une couche composite de 10 mm d'épaisseur. S'agissant d'un nouveau matériau pour revêtement, sans matériau de référence évident, des travaux considérables ont été entrepris pour développer des mélanges EHFG présentant les meilleures propriétés. En outre, une évaluation principalement axée sur les résultats des essais s'est avérée nécessaire.

La formulation initiale, conçue à partir des premières recherches, a été améliorée au cours du projet. Elle a évolué à travers les différentes étapes suivantes : sélection des constituants, étude de formulation, application en laboratoire, évaluation du comportement. Elle a été évaluée en fonction des propriétés déterminantes, à savoir : adhérence, fonction de liaison, protection des couches inférieures de la chaussée, comportement en fissuration, adhésion du mortier hydraulique avec le support bitumineux.

De manière générale, l'épaisseur de la couche en mortier fibré a été minimisée pour des raisons de coûts. En même temps, elle devait être suffisante pour permettre une bonne pénétration des gravillons dans le mortier frais.

La formulation a été améliorée en fonction des résultats des nombreux essais sur les matériaux, réalisés par les laboratoires nationaux. Dans une mince couche de surface en EHFG, des fissures discrètes risquent d'apparaître, sauf si la couche est adhérente à la couche de base. Toutefois, indépendamment du soutien assuré par la liaison avec la structure sous-jacente, des microfissures apparaîtront inévitablement, du fait du retrait hydraulique et des contraintes d'origine thermique. Pour que l'ouverture des fissures reste au niveau micro, un renforcement est nécessaire. La couche de mortier étant mince, les recherches ont indiqué que des fibres d'acier devraient être ajoutées au mélange, pour répondre à ce besoin.

R.5.1 Principales conclusions des essais de phase II sur l'Enduit Hydraulique Fibré Gravillonné

Le programme d'essais a été essentiellement réalisé en laboratoire et a porté sur les principales performances suivantes :

- Propriétés physiques générales de l'EHFG, notamment en ce qui concerne la liaison avec le support et la capacité à établir une adhésion durable du granulat avec la matrice.
- Propriétés de ductilité et de fatigue.
- Propriétés de durabilité sous l'effet de l'environnement.
- Propriétés de surface, bruit et adhérence.

Les essais sur la matrice concernant la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité ont montré que le matériau pouvait être caractérisé par une résistance et un module élevés. Les résultats indiquent que les couches de roulement en EHFG présenteraient de bonnes propriétés de liaison et de durabilité. Ils confirment ainsi la réalisation des objectifs fixés.

Les essais à échelle intermédiaire ont montré qu'il était possible d'établir une liaison durable entre le support bitumineux et l'enduit hydraulique fibré gravillonné, si la surface de bitume était soigneusement grenillée et nettoyée avant la mise en œuvre de l'EHFG. Il est également déterminant que la couche bitumineuse sous-jacente présente un module d'élasticité et une résistance à la température élevés. Bien qu'une perte de gravillons de l'ordre de 10 % soit probable, essentiellement en tout début de service, l'adhésion de la matrice avec le granulat s'avère de qualité suffisante pour que la majorité des gravillons restent en place pendant toute la durée de vie de la chaussée.

R.5.2 Conclusions sur les performances attendues de l'enduit hydraulique fibré gravillonné

Les essais ont montré que l'EHFG avait une résistance et une intégrité élevées. Il est clair que certaines exigences restent à satisfaire (en particulier, couche inférieure résistante, bon enchâssement des gravillons), pour obtenir des performances optimales.

Par rapport au bitume-époxy, l'enduit hydraulique fibré gravillonné nécessite des développements complémentaires, concernant en particulier les techniques de mise en œuvre, avant son lancement sur le marché, en tant que revêtement à longue durée de vie.

Toutefois, les essais réalisés en phase II, en même temps que l'étude de formulation de l'EHLFG, montrent que les incertitudes actuelles sur les applications de l'EHLFG seront très probablement levées à l'avenir.

Au vu des essais réalisés et des performances mises en évidence, on considère que, si la couche d'EHLFG se comporte bien pendant la ou les deux premières années, une dégradation générale est improbable dans les années suivantes. Ce revêtement devrait, au terme d'essais complémentaires, faire place à un produit final, caractérisé par une sécurité, un confort et une durabilité élevés, ainsi qu'un bruit limité.

R.5.3 Questions relatives aux recherches et essais ultérieurs sur l'enduit hydraulique fibré gravillonné

Plusieurs questions doivent faire l'objet de recherches et d'essais ultérieurs, notamment les suivantes :

- *Effet du dosage en eau sur les propriétés de l'EHLFG.* Le dosage en eau a un effet important sur les propriétés techniques du mortier : facilité de malaxage (à l'échelle industrielle) et maniabilité, perte de gravillons, liaison avec le bitume.
- *Technique d'application industrielle.* L'adaptation des équipements existants ou le développement pratique d'un nouvel équipement de mise en œuvre doivent être étudiés en priorité, pour appuyer les essais de terrain proposés en phase III.
- *Tendance à la fissuration en deux dimensions.* La piste d'essai choisie pour tester la tendance à la fissuration en deux dimensions doit être représentative d'une chaussée réelle et mise en œuvre sur un matériau bitumineux suffisamment rigide.

R.5.4 Questions relatives à la construction de l'Enduit hydraulique fibré gravillonné

La production de l'EHLFG semble possible avec le savoir-faire et les équipements actuels. Cependant, certaines modifications des équipements existants ou le développement d'un nouvel équipement seront nécessaires pour mettre en œuvre le mortier d'EHLFG et insérer les gravillons. Les éléments importants en matière de construction sont la disponibilité des matériaux constitutifs, le processus de malaxage et la maniabilité du matériau fraîchement malaxé. Dans l'idéal, l'épandage des gravillons devrait être effectué immédiatement après la mise en œuvre de la mince couche de mortier, c'est-à-dire avec le même engin ou avec un gravillonneur. Un léger compactage ou damage sera ensuite nécessaire pour assurer un bon enclassement des gravillons, ainsi qu'une surface de roulement plane et unie.

R.6 Résumé des conclusions de l'étude

Le projet reflète les préoccupations des maîtres d'ouvrage, suscitées par une innovation lente et limitée dans les techniques de chaussées, où les industriels dominent depuis de nombreuses années. Le projet a pu démontrer qu'il existait des perspectives de progrès importants, grâce à des matériaux qui n'ont pas été conçus du point de vue d'un dimensionnement classique des chaussées. Après avoir démontré le potentiel réel des nouveaux matériaux, nous espérons que les industriels et les maîtres d'ouvrage travailleront ensemble à la mise en œuvre de ces innovations.

R.6.1 Propriétés et performances des chaussées actuelles

Le maintien de revêtements sûrs, confortables et durables sur les autoroutes à fort trafic représente depuis longtemps un défi majeur pour les maîtres d'ouvrage et les équipes opérationnelles, qui gèrent la construction et l'entretien des routes.

- Les chaussées rigides en béton sont souvent choisies pour les routes à très fort trafic, car elles offrent une résistance et une durabilité élevées. Cependant, les exigences modernes en termes de confort et de réduction du bruit militent pour une macrotexture initiale limitée, qui peut entraîner une faible adhérence après dix à vingt ans de service.
- Les chaussées semi-rigides permettent l'utilisation d'un revêtement souple sur un support rigide en matériaux traités aux liants hydrauliques, répondant aux exigences de portance d'une route à fort trafic. Cependant, elles requièrent des opérations d'entretien et de remise en état assez fréquentes, pour assurer la sécurité et le confort nécessaires, par exemple sur les autoroutes à fort trafic automobile circulant à des vitesses relativement élevées.
- Les chaussées souples, dans lesquelles le revêtement et la couche de base sont composés de matériaux flexibles, traités aux liants bitumineux, constituent le troisième type de chaussées, probablement le plus courant, pour routes à forte circulation, malgré leurs problèmes inhérents de déformation et de fatigue sous des charges de trafic lourd.

Bien que des recherches récentes aient permis d'améliorer sensiblement la durabilité des couches structurelles des chaussées, les couches de surface supportent difficilement l'augmentation des charges et de la densité de trafic. Parallèlement, la demande de chaussées peu bruyantes vient s'opposer à l'objectif de durabilité, dans la mesure où ces types de revêtements tendent à réduire la durée de service. C'est pourquoi, les fermetures fréquentes de routes pour réparation et remise en état sont encore à l'ordre du jour et constituent un problème croissant, car elles contribuent de manière importante à l'augmentation des encombrements.

R.6.2 Avantages attendus des revêtements de chaussées à longue durée de vie

Les deux types de revêtements de chaussées à longue durée de vie qui ont fait l'objet des recherches décrites dans le présent rapport sont envisagés pour résoudre les problèmes des chaussées actuelles. En effet, ils ont été conçus pour une durée de service minimale de 30 ans. Les interprétations et les extrapolations des résultats des essais menés au cours du projet ne contredisent pas les hypothèses selon lesquelles cet objectif serait réalisable.

L'un des deux matériaux à longue durée de vie, le bitume-époxy, a déjà démontré sa capacité à assurer une aussi longue durée de service, en tant que revêtement sur tabliers de ponts en acier. Les essais en laboratoire et les essais de charge accélérés ont confirmé que ce matériau possédait d'excellentes qualités sur les principaux indicateurs de performances permettant d'évaluer la longévité, tels que la rigidité et la résistance à l'orniérage, la fissuration à basse température, la fissuration par fatigue, l'abrasion de surface (même après oxydation) et la sensibilité aux dommages dus à l'eau.

L'expérience des essais et, par ailleurs, la prise en considération des technologies disponibles ont fourni des renseignements sur le processus de production et de construction nécessaire pour l'utilisation à grande échelle des bitumes époxy comme revêtements de chaussées routières. En conclusion, ces processus ne présentent pas de problèmes inhabituels, mais le respect des durées et la sécurité des opérateurs sont d'importants éléments dont il faut tenir compte.

L'autre matériau à longue durée de vie, l'enduit hydraulique fibré gravillonné, renforcé de fibres d'acier, représente une application nouvelle d'une classe de matériaux qui a déjà fait l'objet de nombreuses recherches à d'autres fins de construction, ces dernières années. On sait donc depuis le début du projet qu'il offre une résistance exceptionnellement élevée, même lorsqu'il est utilisé, comme ici, pour un revêtement de chaussée extrêmement mince (seulement 10 mm). De nombreuses études ont été réalisées dans la conception du mélange de béton, afin d'obtenir une formulation qui ne serait pas sensible à la fissuration, puis de déterminer la meilleure façon d'assurer une liaison durable avec le support. D'autres recherches ont été effectuées pour insérer les granulats dans la matrice, afin d'assurer une bonne adhérence et d'obtenir des propriétés de frottement élevées pendant plusieurs dizaines d'années. Cet objectif a également été atteint. En résumé, l'EHLFG a montré ses capacités de longévité grâce à des propriétés telles que la liaison avec le support, l'adhésion durable du granulat avec la matrice, la résistance à la fatigue, la durabilité sous l'effet de l'environnement et les caractéristiques de surface, notamment l'adhérence.

La production de l'EHLFG semble possible avec le savoir-faire et les équipements actuels. En revanche, la mise en œuvre semble moins aisée avec la technologie actuelle, sans la modification des équipements existants ou le développement d'un nouvel équipement.

En conclusion, les deux matériaux, l'enduit hydraulique fibré gravillonné, renforcé de fibres d'acier, et le bitume-époxy, pourront très probablement apporter des solutions durables à la demande de revêtements pour les chaussées existantes, si celles-ci possèdent une longue durée de vie résiduelle.

Évidemment, tout ceci a un coût, qui doit être pris en compte. Ces coûts sont résumés dans la section suivante et dans le tableau y figurant. Il est également clair que les deux matériaux doivent maintenant faire l'objet d'essais limités en conditions de trafic, avec des méthodes de fabrication et de mise en œuvre réalistes. Cette question est examinée dans la dernière section.

R.6.3 Coûts indicatifs des couches de roulement en bitume-époxy, en Enduit hydraulique fibré gravillonné et en bitume traditionnel

Cette section présente une comparaison entre les coûts indicatifs des revêtements de bitume-époxy et d'enduit hydraulique fibré gravillonné. Elle compare également ces estimations avec les coûts des revêtements actuels, constitués de matériaux traditionnels (de référence).

Les coûts réels des deux types de revêtements devraient évidemment varier en fonction de la quantité utilisée et d'un certain nombre d'éléments, comme l'expérience du maître d'œuvre et du fournisseur, ainsi que le lieu et le pays ou la région.

Coûts et risques liés au bitume-époxy

Les coûts indicatifs figurant dans le tableau plus bas ont été essentiellement estimés à partir du prix du granulat naturel et du bitume-époxy, ainsi que du prix habituel du malaxage, du transport et de la mise en œuvre, avec la technique de production actuelle. L'expérience en la matière étant très limitée, seuls quelques pays ont pu fournir des estimations.

L'adhérence d'un revêtement de bitume-époxy diminuera avec le temps et devra éventuellement être rétablie pendant la vie structurelle de la couche de surface. Ce traitement a été pris en compte dans l'évaluation économique réalisée en phase I, mais n'a pas été inclus dans les coûts des travaux initiaux, figurant dans le tableau R.1.

Coûts et risques liés à l'enduit hydraulique fibré gravillonné

Dans la mesure où il n'existe pas encore d'applications commerciales, l'incertitude actuelle est plus grande concernant les matériaux et les coûts des revêtements en Enduit hydraulique fibré gravillonné qu'en bitume-époxy.

Les coûts indicatifs des couches de roulement en EHFG sont évalués par extrapolation des coûts des matériaux, du malaxage et du transport pour les chaussées en béton actuelles, et à partir des coûts estimés de mise en œuvre, qui seront plus élevés (la différence dépendra des modifications des équipements existants ou du développement d'un nouvel équipement).

Revêtement traditionnel (de référence)

Des estimations de coûts ont été fournies par plusieurs pays. Elles portent généralement sur une couche de surface mince de 30 mm ou sur une couche de roulement de type enrobé (SMA), utilisées dans chacun des pays. Les réponses ont indiqué que les coûts actuels d'un revêtement traditionnel, qui ont sensiblement augmenté, notamment en Europe de l'Ouest, pourraient être estimés à 20 EUR par mètre carré. Les coûts réels varient entre 13 et 25 EUR, selon le lieu.

Comparaison des coûts indicatifs

Le tableau R.1 présente les coûts indicatifs d'un bitume-époxy, d'un Enduit hydraulique fibré gravillonné et d'un bitume traditionnel (de référence) « mince » de 30 mm, généralement utilisé comme matériau de base standard. Ces chiffres sont considérés comme des évaluations réalistes de coûts indicatifs, valables en Europe de l'Ouest.

Tableau R.1. **Comparaison des coûts indicatifs entre matériaux**

Description	Coûts d'un revêtement courant en EUR/M ² (Europe de l'Ouest)		
	Couche de roulement en bitume-époxy de 30 mm	Couche de roulement en EHFG de 10 mm	Solution en bitume traditionnel de 30 mm
Durée de vie attendue	~ 30 ans	~ 30 ans	7 - 15 ans
Fraisage (50-100 mm)	0.75 – 1.25	0.75 – 1.25	0.75 – 1.6
Couche de liaison (50 mm)	6 - 10	8 - 12	6 - 12
Couche d'accrochage	0.25		0.1
Couche de roulement	18 – 33.5	18 - 22	6 - 12
Coût total	25 - 45 ⁽¹⁾	27 - 35	13 - 25 ⁽²⁾

Remarques : 1. Coût de rétablissement de l'adhérence (une fois pendant la durée de service) non compris.
2. Coûts de réparations mineures (pendant 15 ans de service) non compris.

Les estimations figurant dans le tableau R.1 suggèrent qu'un revêtement avancé pourrait être deux à trois fois plus cher qu'une réfection classique. Les coûts indicatifs des couches de roulement en bitume-époxy et en enduit hydraulique fibré gravillonné, par rapport aux coûts du revêtement traditionnel (de référence), sont probablement inférieurs aux coûts supposés lors de la phase I du projet. Cela est dû, d'une part, à une meilleure compréhension des coûts et des procédures de production mais aussi, d'autre part, à la hausse significative du coût du revêtement bitumineux, observée ces dernières années, notamment en Europe de l'Ouest.

L'évaluation des coûts sur la durée de vie, réalisée en phase I, a montré que la mise en œuvre d'un revêtement avancé sur les routes à forte circulation apporterait un avantage net si le taux d'actualisation utilisé dans l'analyse était inférieur à 6 % par an et si le revêtement avancé ne coûtait pas plus de trois fois le revêtement traditionnel. Cet avantage a été estimé dans une analyse des coûts sur une durée de vie d'au moins 30 ans et prend en compte les coûts des retards pour l'utilisateur, occasionnés par les opérations d'entretien. Les estimations établies dans le tableau R.1 s'avèrent cohérentes, de manière générale, avec cette enveloppe de coûts.

Dans ce contexte, c'est évidemment à chaque pays de déterminer, en analysant ses données nationales afin de décider au cas par cas, quand un revêtement avancé pourrait être approprié et si les avantages à long terme, dont la réduction des coûts d'entretien et des coûts connexes pour l'utilisateur, compensent la différence de coût initiale. Certains indicateurs montrent qu'il existe une probabilité raisonnable qu'il en soit ainsi.

Après avoir démontré le potentiel réel que possèdent les nouveaux matériaux, nous espérons que les industriels et les maîtres d'ouvrage pourront travailler ensemble à la mise en œuvre de ces innovations. Il est également clair que les deux matériaux doivent maintenant faire l'objet d'essais limités en conditions de trafic, avec des méthodes de fabrication et de mise en œuvre réalistes. Cette question est examinée dans la dernière section.

R.7 Recommandations pour les essais de phase III

Les recherches de phase II ont permis de réunir les résultats complets des essais en laboratoire et des essais de chaussée accélérés.

Les perspectives de durabilité et de longévité des matériaux sont basées sur les extrapolations des observations réalisées pendant les essais décrits dans le présent rapport. Personne ne peut garantir pleinement le comportement des matériaux dans le domaine temps extrapolé. En conséquence, si les avantages économiques potentiels de ces types de chaussées à technologie avancée doivent se réaliser, le processus d'innovation doit passer à l'étape suivante, pendant laquelle les matériaux seront testés à grande échelle, en conditions réelles de trafic, sur route et hors route.

Le projet a donc avancé jusqu'au point où ces essais de terrain limités, en conditions de trafic (sur le réseau routier ou hors route), constituent logiquement la phase suivante et s'avèrent nécessaires pour tirer parti des avantages économiques potentiels de ces matériaux et de ces techniques. Il est également évident, comme toujours lors d'essais à grande échelle de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques, qu'il existe des risques. On suppose cependant que quelques administrations routières, peut-être en partenariat avec les industriels, seront prêtes à entreprendre cette étape.

Bien que cette démarche puisse être effectuée individuellement, la planification et la coordination conjointe des essais et des démonstrations permettent d'établir plus rapidement et plus largement, de bonnes pratiques universelles.

Ce programme d'essais coordonnés viserait à démontrer que les performances supposées à partir des essais en laboratoire et des essais accélérés seront confirmées pendant les séries d'essais en conditions réelles de trafic et d'environnement et qu'un grand nombre des objectifs secondaires et des objectifs spécifiques aux matériaux, décrits plus loin, pourront également se réaliser.

R.7.1 Principaux objectifs des essais

Le principal objectif d'un programme coordonné d'essais de terrain sur les revêtements de bitume-époxy et d'enduit hydraulique fibré gravillonné, offrant de réelles perspectives d'application aux chaussées à longue durée de vie, est le suivant :

- Démontrer que les performances envisagées à partir des essais en laboratoire et des essais accélérés seront confirmées pendant les séries d'essais en conditions réelles de trafic et d'environnement.

Les objectifs secondaires sont les suivants :

- Concevoir des méthodes de construction (notamment des normes de préparation du support) compatibles avec les propriétés des matériaux, ainsi qu'avec les spécifications de quantité et de qualité relatives à la chaussée.
- Améliorer la base d'une estimation réaliste des coûts de construction avec ces matériaux.
- Étudier les variations de performances dans des conditions de trafic variables, ainsi que les effets de variations limitées dans les propriétés des granulats pouvant influencer sur les caractéristiques de frottement et de bruit à long terme des chaussées étudiées, en trafic réel.
- Améliorer le niveau de confort des maîtres d'œuvre en leur offrant la possibilité d'acquérir de l'expérience sur ces matériaux de chaussées avancés.

Le dernier point est particulièrement important. On peut espérer qu'avec l'apprentissage, les maîtres d'œuvre adapteront les pratiques de construction aux nécessités et qu'avec l'acquisition d'expérience et l'augmentation des volumes, les coûts de mise en œuvre des revêtements avancés finiront par baisser.

R.7.2 Objectifs spécifiques des essais de phase III sur le bitume-époxy

Le bitume-époxy est prêt pour des démonstrations sur route à grande échelle. Les difficultés de fabrication et de mise en œuvre du matériau sont considérées comme modérées. La principale question pratique concerne les éventuels effets sur la santé du liant bitumineux époxy non polymérisé, qui ont entraîné d'importantes limitations d'utilisation dans certains pays. Toute réserve des autorités de santé doit donc être mise en évidence et résolue à ce stade.

Les objectifs des essais spécifiques sur le bitume-époxy sont variés : essais sur les matériaux disponibles localement, détermination des performances des bitumes époxy selon la formulation chimique, effet du type de granulat sur les caractéristiques des revêtements à longue durée de vie, essais sur différentes épaisseurs de couches de bitume-époxy et essais dans des régions aux climats différents.