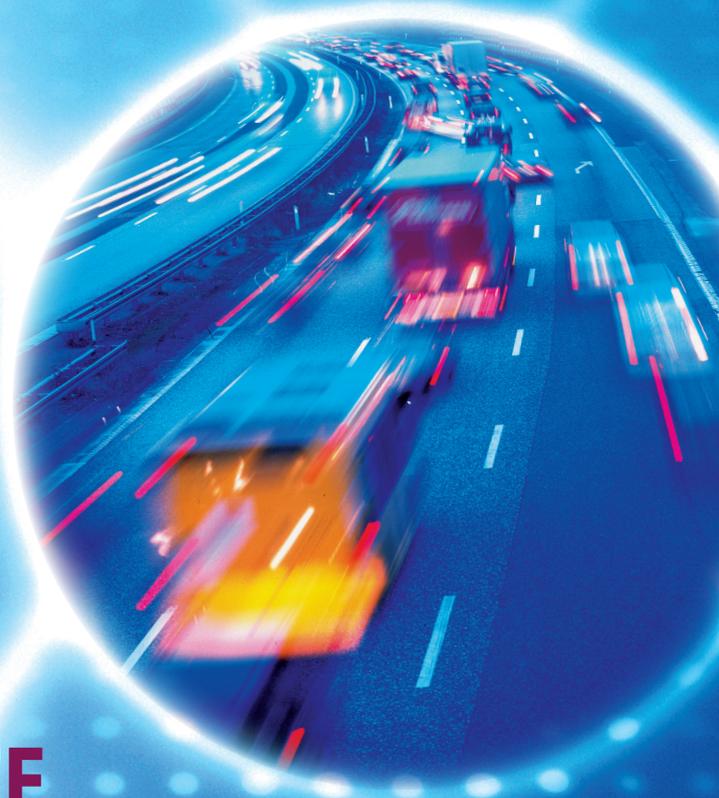




CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

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 elongation 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.

R.7.3 Objectifs spécifiques des essais sur l'enduit hydraulique fibré gravillonné

Les objectifs des essais spécifiques sur l'enduit hydraulique fibré gravillonné sont variés : utilisation des matériaux disponibles localement, par opposition aux matériaux d'un même fournisseur, développement de techniques de mise en œuvre du mortier et d'insertion des gravillons, essai sur plusieurs couches de base bitumineuses et différents mélanges d'un rapport eau/ciment variant entre 0.20 et 0.30, pour obtenir le meilleur équilibre entre malaxage/transport/mise en œuvre et performances du matériau durci.

R.7.4 Essais de terrain proposés en phase III : résumé des recommandations

Les essais de terrain sont recommandés pour tester les nouveaux matériaux de revêtements en conditions réelles de trafic et d'environnement, favoriser l'amélioration des techniques de fabrication et de mise en œuvre, ainsi que le développement d'un nouvel équipement, si nécessaire, et privilégier le contrôle qualité.

Les principales recommandations sont les suivantes :

- Que les administrations routières intéressées soient invitées à manifester auprès du Secrétariat du CCRT leur souhait de participer aux essais proposés dès que possible après la publication du présent rapport et dans un délai maximal d'un an.
- Qu'une réunion préparatoire soit convoquée par l'organisation hôte, lorsqu'un minimum de trois offres d'essais sur l'un quelconque des matériaux ont été reçues. Cette réunion préparatoire doit désigner un coordinateur de projet et convenir des principaux programmes et principes de gestion des essais.
- Que les participants commencent les essais à la date qui leur convient, après la réunion préparatoire, et au plus tard en mai 2009. Les essais doivent durer au moins deux ans et être terminés au plus tard en mai 2011.
- Que les participants soient prêts à remettre leur rapport final dans les trois mois suivant la fin des essais et au plus tard en juillet 2011. Les deux rapports consolidés, un pour chaque type de matériau, doivent être rédigés par les coordinateurs pour les deux séries d'essais. Les réunions finales doivent permettre de réviser et de valider les versions finales des rapports.

Les recommandations annexes sont les suivantes :

- Que le CCRT assume le rôle d'organisation hôte et la responsabilité de convoquer les réunions des participants pendant cette phase d'essais sur le terrain.
- Que la responsabilité du financement et de la gestion des essais sur le terrain, ainsi que de l'enregistrement et de la diffusion des résultats incombe aux organisations de parrainage, aux participants et aux coordinateurs de projet.

NOTE

1. Remarque : les coûts habituels des travaux routiers mentionnés dans les conclusions du rapport de phase I sont indiqués en dollars américains et prennent en compte les cours du change en vigueur à la date de rédaction du rapport de phase I.

1. ANTÉCÉDENTS ET CONTEXTE

1.1 Antécédents

Depuis plus de 50 ans, les propriétés des chaussées routières font l'objet d'une longue et riche tradition de recherche, représentent une discipline importante des études d'ingénieur des routes, constituent le sujet phare d'innombrables séminaires et congrès et font l'objet de décisions aux énormes conséquences économiques pour les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre.

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. 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 apportés par l'absence de réparations et de mises en état importantes peuvent être suffisamment grands pour justifier les coûts initiaux élevés de ce type de chaussées.

Il a été démontré que les couches sous-jacentes des chaussées pouvaient atteindre les objectifs de longévité qui viennent d'être décrits. En revanche, la couche de surface ou couche de roulement, déterminante pour la sécurité et le confort de conduite, reste le talon d'Achille de ce concept. Cette mince couche de chaussée superficielle est, plus que toute autre partie de la structure, exposée à l'air, au soleil et aux précipitations, ainsi qu'à l'usure, aux contraintes et à la déformation liées au trafic qu'elle supporte.

1.2 Contexte des couches de roulement à longue durée de vie

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. Tout ceci sous la surveillance étroite de la population, qui contribue au financement des routes, qui utilise régulièrement le réseau routier et qui exige de manière croissante une amélioration du service en termes de sécurité, de fiabilité, d'impact environnemental et de confort.

Dans ce contexte, les états attendent visiblement des administrations routières qu'elles améliorent la gestion du réseau routier et qu'elles répondent de leurs activités. De fait, dans de nombreux pays, les administrations routières locales doivent satisfaire aux exigences de responsabilité et d'information sur les modalités de gestion de leur patrimoine.

De nombreuses administrations routières ont adopté une méthode de gestion du patrimoine qui, appliquée au secteur des routes, constitue « une procédure systématique de gestion, de modernisation et d'exploitation du patrimoine, associant les normes techniques à une pratique commerciale saine et à un raisonnement économique solide, et offrant les outils nécessaires à une approche plus organisée et plus souple de la prise de décisions, afin de répondre aux exigences de la population ».

Le rapport intitulé « Évaluation économique des chaussées à longue durée de vie - Phase I » (OCDE, 2005) résume le contexte actuel et l'importance du projet Chaussées à longue durée de vie, dans les termes suivants :

« 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.

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. »

1.3 Coûts sur la durée de vie

Il est de plus en plus important d'examiner un projet sur le long terme. La notion de coûts sur la durée de vie n'est pas nouvelle et a été adoptée par de nombreuses administrations routières. Elle exige une évaluation économique prenant en compte les coûts actuels et prévisionnels significatifs, exprimés en valeur monétaire, sur toute la période d'analyse. Les coûts prévisionnels sont nécessaires pour obtenir les niveaux de performance définis, en termes de fiabilité, de sécurité et de disponibilité.

L'analyse des coûts sur la durée de vie permet de définir le montant et l'échéancier 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.

Dans le domaine des routes, la participation du secteur privé est souvent considérée non seulement comme une source de capitaux propres, mais aussi comme un facteur d'innovation et de réflexion originale dans les méthodes de construction. Grâce à l'engagement des entreprises privées, généralement à plus long terme qu'auparavant, l'histoire récente a montré que les bureaux d'étude et les maîtres d'œuvre envisageaient les matériaux et les procédures de construction avec l'objectif de réduire les coûts généraux, y compris ceux associés aux opérations d'entretien sur le long terme.

Dans un cadre privilégiant la durabilité à long terme, il convient également d'examiner les possibilités de recyclage de l'ensemble d'une chaussée, à la fin de sa durée de service. Ces possibilités dépendront des matériaux utilisés (bitume-époxy ou béton) et de la qualité des granulats employés.

1.3.1 *Les chaussées à longue durée de vie sont-elles financièrement abordables ?*

Des matériaux de chaussées avancés, de meilleure qualité et de remplacement, sont nécessaires pour réduire les opérations d'entretien, les problèmes d'encombrement et les coûts des maîtres d'ouvrage et des usagers.

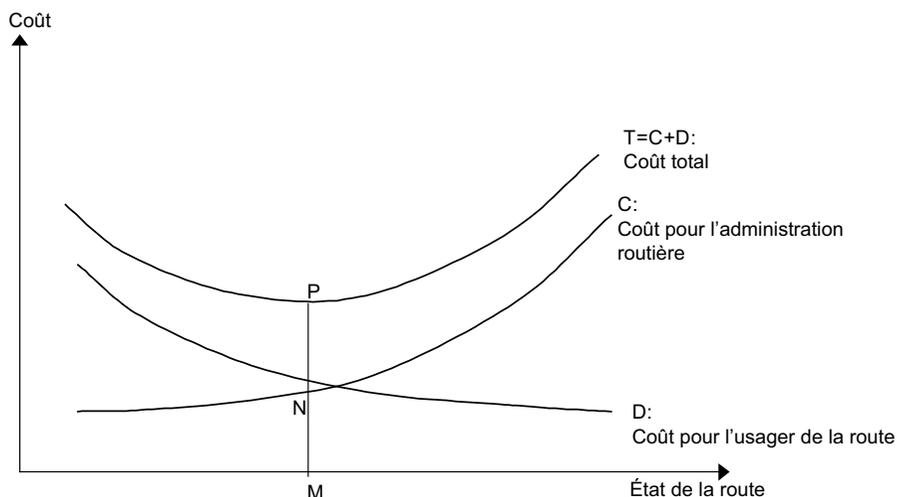
La « grande » question qui se pose est donc la suivante : est-il rentable de dépenser plus, au départ, dans des systèmes de revêtements avancés, pour ensuite économiser en travaux et réduire les encombrements, lorsque l'analyse est effectuée en termes de coûts sur la durée de vie ?

1.3.2 *Expérience internationale récente*

Des recherches réalisées au cours des 10 à 15 dernières années ont étudié les coûts sur la durée de vie qui doivent être pris en compte pour répondre à cette « grande » question. Ces coûts comprennent les coûts d'exploitation des véhicules, les coûts liés aux accidents, ainsi que les coûts liés aux retards occasionnés par les opérations d'entretien et de remise en état.

Le rapport intitulé « *Entretien et réhabilitation des routes : Financement et stratégies d'affectation* » (OCDE, 1994), relatif aux stratégies de financement et d'affectation des fonds pour l'entretien et la remise en état des routes, résume la répartition probable des différents coûts directs des administrations routières et des coûts des usagers, ainsi que leurs effets potentiels sur les stratégies d'entretien adoptées. Ces coûts sont indiqués sur la Figure 1.1, extraite du rapport de l'OCDE.

Figure 1.1. Approche technico-économique d'optimisation de la remise en état et de l'entretien routiers (OCDE, 1994)



M = État optimal de la route

MN = Budget nécessaire au maintien de la route dans son état optimal

MP = Coût total pour le maintien de la route dans son état optimal

Source : (OCDE, 1994)

Comme le montre ce graphique indicatif, si les administrations routières fondent uniquement leurs décisions sur la réduction de leurs coûts directs, elles seront probablement amenées à réaliser des opérations d'entretien routier à des intervalles qui entraîneront l'augmentation des coûts des usagers. Le coût total du projet sera loin d'être optimal.

Les différents types de chaussées ont différents profils de coûts sur la durée de vie. Les coûts de construction initiaux sont souvent dépassés par les coûts d'exploitation. Il existe de nombreux autres aspects qui peuvent avoir un effet sur l'analyse du coût de la durée de vie et qui varient probablement beaucoup d'une région à l'autre. Ainsi, les variations dans le type de route, le type de chaussée et l'état de la route entraînent sans aucun doute une diversité des coûts de construction et d'exploitation, ainsi que des coûts pour les usagers. Il existe d'autres différences entre pays, par exemple dans les paramètres d'évaluation, tels que la période d'analyse pour l'évaluation du projet, le taux d'actualisation utilisé et la valeur de liquidation (ou valeur résiduelle) des ouvrages à la fin de la période d'évaluation.

Tous ces aspects doivent être examinés avec soin pour effectuer une évaluation appropriée. Le chapitre suivant expose les conclusions de la première phase du projet *Évaluation économique des chaussées à longue durée de vie*, qui a étudié ces questions plus en détail.

2. PRINCIPALES CONCLUSIONS DE L'ÉTUDE DE PHASE I

2.1 Vue d'ensemble

La première phase de ce projet, intitulée *Évaluation économique des chaussées à longue durée de vie – Phase I* (OCDE, 2005), a été réalisée dans le cadre du programme de l'OCDE, Recherche en matière de transports routiers et liaisons intermodales (RTR), achevé en décembre 2003.

Les travaux de phase I ont évalué l'enveloppe des coûts assurant la rentabilité des nouvelles couches de roulement à longue durée de vie, en tenant compte de tous les coûts engagés, y compris les coûts de construction initiaux, ainsi que les réductions de coûts d'entretien et de coûts pour les usagers, à plus long terme.

2.2 Conclusions économiques – Rapport de phase I sur les chaussées à longue durée de vie

L'étude de phase I a évalué la théorie selon laquelle la construction d'un revêtement routier avancé, à longue durée de vie, mais aux coûts initiaux plus élevés, pourrait être rentable (en termes de coûts sur la durée de vie), par rapport à un revêtement traditionnel, si l'on envisageait les coûts pour les usagers. Le rapport de phase I a examiné les aspects qui devaient être pris en compte dans l'analyse économique et a souligné l'importance que représentaient les coûts des usagers dans une analyse. Les routes à forte circulation sont souvent encombrées en raison des accidents et des incidents, des opérations d'entretien et d'une sous-capacité. Ces encombrements entraînent des coûts pour les usagers (particuliers et entreprises, transporteurs et leurs clientèles) et, par conséquent, pour toute la collectivité.

Les travaux de la phase I n'ont pu effectuer qu'une analyse économique indicative, puisque les matériaux avancés n'avaient pas encore, dans les premiers temps de l'étude, été définis ni testés. Au fur et à mesure des recherches sur les matériaux éventuels et leurs propriétés, l'analyse économique s'est axée sur l'enveloppe des coûts et les performances nécessaires pour que ces nouveaux matériaux de couches de roulement puissent être rentables. Les critères fondamentaux utilisés pour l'analyse sur les routes à forte circulation sont les suivants :

- Trafic : 40 000 à 100 000 TMJA.
- Pourcentage de poids lourds : 5 % à 20 %.
- Taux d'actualisation : 3 % à 10 %.
- Coût du revêtement : 3 à 5 fois les coûts actuels des matériaux de référence.
- Vie utile du revêtement avancé jusqu'à l'intervention d'entretien : 30 à 40 ans.
- Taux de croissance du trafic : 1 % à 2 % par an.

L'analyse économique réalisée en phase I a montré que dans certains cas, il serait très avantageux de concevoir de nouvelles couches de roulement à longue durée de vie, possédant les caractéristiques de performances appropriées. Les conclusions détaillées figurant dans le résumé du rapport de phase I sont les suivantes¹ :

« 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 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 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.

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 USD à 3.6 millions 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.

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. »

La principale conclusion de l'analyse économique est donc que, dans le cas d'une modélisation standard à partir des hypothèses exposées, l'utilisation des couches de roulement à longue durée de vie devrait présenter des avantages économiques, lorsque le coût initial est environ trois fois supérieur à

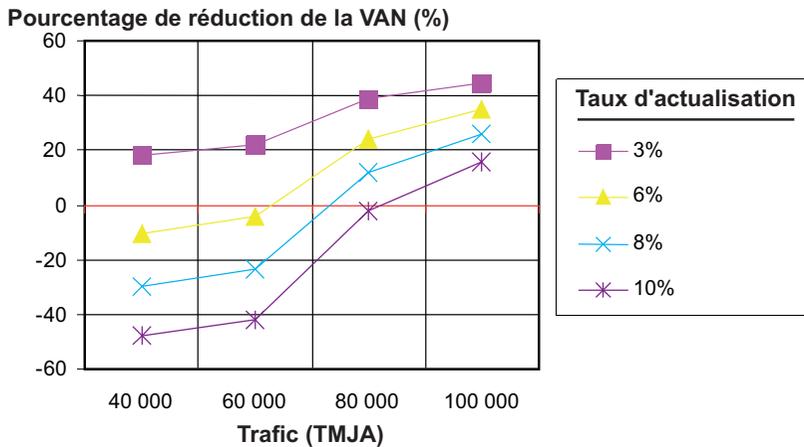
celui des revêtements traditionnels et que le volume de trafic est élevé. L'analyse a également montré l'importance des coûts pour les usagers. Les couches de roulement avancées, à longue durée de vie, seront plus économiques lorsque les coûts pour les usagers seront pris en compte. En effet, l'absence de perturbations pour les usagers, liées aux opérations d'entretien, présente d'importants avantages.

2.2.1 Résultats des essais de sensibilité

Les résultats des variations de quelques-uns des principaux paramètres et hypothèses utilisés dans l'analyse économique sont mis en évidence sur la Figure 2.1, qui montre le pourcentage de réduction de la VAN pour le revêtement avancé à longue durée de vie, par rapport au revêtement traditionnel (une valeur supérieure à zéro indique une réduction, en cas d'utilisation d'un revêtement à longue durée de vie).

La Figure 2.1 part de l'hypothèse que les coûts du revêtement avancé sont trois fois supérieurs à ceux du revêtement traditionnel. Elle montre que le résultat de l'analyse est très sensible au taux d'actualisation choisi. Si ce dernier est élevé, les couches de roulement à longue durée de vie ne seraient avantageuses que sur les routes à forte circulation (par exemple, TMJA supérieur à 80 000).

Figure 2.1. Résultats de l'analyse de sensibilité



Source : OCDE (2005).

Si le coût initial de la couche de roulement à longue durée de vie est cinq fois supérieur au coût d'une couche de surface traditionnelle, ce revêtement ne serait avantageux que sur les routes à forte circulation dans les pays possédant des taux d'actualisation très faibles.

Pour les options de revêtement avancé, les essais de sensibilité ont indiqué les éléments suivants :

- La valeur actuelle nette (VAN) des réductions par rapport à l'option de revêtement traditionnel s'élève à mesure que le flux de trafic augmente ou que le taux d'actualisation diminue.
- Certaines réductions sont probables pour les routes à forte circulation (TMJA supérieur à 80 000), quel que soit le taux d'actualisation.

- Seuls les projets routiers à trafic lourd permettront une réduction avec des taux d'actualisation atteignant 10 %.
- À des volumes de trafic plus faibles (TMJA d'environ 60 000), la réduction ne se produira qu'avec des taux d'actualisation faibles (de l'ordre de 3 %).
- Si le TMJA est d'environ 40 000 ou moins, il n'y aura probablement pas de réduction.
- Les couches de roulement à coût élevé (cinq fois supérieur au coût des couches de roulement traditionnelles) ne seront rentables qu'avec des taux d'actualisation très faibles (3 %) et pour des volumes de trafic élevés.

En résumé, le revêtement avancé devrait généralement être rentable pour des TMJA supérieurs à 70 000 ou 80 000. Avec des taux d'actualisation inférieurs à 6 %, les couches de roulement à longue durée de vie pourraient être rentables pour un TMJA de 60 000, voire entre 40 000 et 60 000.

2.2.2 Conclusions concernant les matériaux candidats pour couches de roulement

Les recherches de la phase I ont porté sur une grande variété de matériaux possibles, dans différentes catégories. Les exigences et les propriétés nécessaires des matériaux avancés appropriés ont été prises en compte. Les candidats ont ensuite été énumérés. Ils ont été étudiés en fonction d'une série de rubriques comprenant les principaux critères suivants :

Dimensionnement	Entretien
Essais	Durée de vie prévue
Production	Coût
Construction	Critères de l'utilisateur
Santé et sécurité	Disponibilité

Les résultats de la comparaison ont permis de formuler des recommandations de matériaux pour la phase suivante du projet. Des aspects plus vastes, liés aux pratiques de préfabrication et de mise en œuvre accélérée, ont également été pris en compte.

L'examen des matériaux de revêtements avancés, actuellement à l'étude ou utilisés de manière limitée dans des projets à petite échelle, a indiqué qu'il existait bien des matériaux susceptibles de servir pour des revêtements à longue durée de vie, conformément aux exigences établies dans l'analyse. Il en a été conclu que deux types de matériaux, en particulier, pourraient satisfaire à ces exigences. Ce sont les suivants :

- **Bitume-époxy.**
- **Béton à hautes performances.**

Les conclusions présentées dans le résumé du rapport de la phase I sont les suivantes :

« 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.

Béton à hautes performances²

En ce qui concerne le béton à hautes performances, bien que toutes ses données proviennent de recherches en laboratoire, ses propriétés sont tout à fait remarquables, en particulier ses propriétés de résistance et de flexion. Ses 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. »

2.2.3 Vers la phase II

Le rapport de la phase I expose des recommandations pour la réalisation du programme de recherche dans le cadre de la phase II du projet. L'objectif de ces travaux ultérieurs est d'évaluer la capacité réelle des matériaux candidats et leur pertinence pour des couches de roulement à longue durée de vie.

Le rapport présente également des suggestions sur les étapes à entreprendre au cours des travaux de phase II. Ces suggestions, qui ont été utiles pour mettre en œuvre les travaux, sont les suivantes :

« 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 décappage et à l'érosion, mais aussi examiner d'autres aspects importants, dont le polissage à long terme, la perte d'adhérence, ainsi que 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 charge accélérés. »

2.3 Étude de phase II

Les programmes d'essais effectivement développés pour le bitume-époxy et l'enduit hydraulique fibré gravillonné sont établis en détail, et leurs résultats sont mis en évidence, aux chapitres 4 et 5. Leurs évaluations sont exposées au chapitre 6. Les conclusions sur la pertinence de ces matériaux pour des revêtements à longue durée de vie sont présentées dans les derniers chapitres du rapport.

NOTES

1. Remarque : les coûts habituels des travaux routiers mentionnés dans les conclusions du rapport de phase I sont indiqués en USD et prennent en compte les taux de change applicables à la date de rédaction du rapport de phase I.
2. Un examen ultérieur du cahier des charges des matériaux pour couches de roulement à longue durée de vie a conduit à adapter les bétons à hautes performances au contexte particulier de l'étude. Ainsi est né l'enduit hydraulique fibré gravillonné, qui est cousin des bétons à hautes performances, mais qui en diffère en plusieurs points majeurs.

3. PHASE II - MANDAT, CHAMP ET ORGANISATION

3.1 Mandat

Le mandat du Centre conjoint de recherche sur les transports, approuvé par le conseil de l'OCDE en 2003, est le suivant :

« Le Centre doit encourager le développement économique et contribuer aux améliorations structurelles des économies de l'OCDE et de la FIT, à travers des programmes de recherche en coopération sur les transports, concernant tous les moyens de transport terrestre et leurs liaisons intermodales, dans un contexte économique, social, environnemental et institutionnel plus large. »

Le programme de travail du Centre conjoint de recherche sur les transports (2004-2006) a été approuvé par les ministres des Transports des pays de l'OCDE et de la FIT, à Ljubljana, en mai 2004 [CEMT/CM(2004)9].

Les orientations stratégiques et le programme de travail du CCRT ont également été approuvés par le conseil de l'OCDE [C(2004)123], en juillet 2004.

3.2 Champ de l'étude de phase II

Le champ proposé de l'étude de phase II sur les chaussées à longue durée de vie, tel qu'approuvé par les ministres des Transports en 2004, est le suivant :

« Cette deuxième phase assurera la coordination d'un nombre suffisant d'essais initiaux, réalisés dans les 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. »

Cette deuxième phase avait pour objectif de renforcer nos connaissances sur le potentiel et les limitations des deux éventuels matériaux candidats, sélectionnés pour faire l'objet de recherches ultérieures sur des couches de roulement innovantes, à longue durée de vie, pendant la phase I : le bitume-époxy et l'enduit hydraulique fibré gravillonné.

3.2.1 Tâches principales

Les principales tâches à réaliser en phase II du projet ont été notamment les suivantes :

- Réunir les informations disponibles sur l'utilisation des matériaux candidats pour la construction de chaussées (formulation, construction, comportement à long terme), en fonction de l'expérience des pays participant à la phase II. Identifier les lacunes et spécifier les exigences de performances plus élevées (durabilité mécanique et environnementale, rapport utilisation-performance).

- Définir un programme d'essai visant à combler les lacunes en matière de connaissances, à améliorer les performances des matériaux, si nécessaire, et à évaluer le comportement réel à long terme de ces matériaux, lorsqu'ils sont posés sur différents types de supports structurels (notons que ces supports doivent aussi présenter des caractéristiques structurelles à longue durée de vie).
- Tester les couches de roulement dans des conditions reflétant les performances attendues, en tenant compte des éventuels changements futurs dans la politique ou la demande (concernant par exemple les limitations de masse, la composition du trafic et la vitesse). Cette opération permettra de faire des comparaisons avec les performances des matériaux habituellement utilisés à l'heure actuelle.
- Assurer la coopération des travaux de recherche entre les différents laboratoires participant à la phase II, afin d'exploiter au mieux les installations d'essai, ainsi que les ressources humaines et autres, et de créer des synergies.
- Évaluer la pertinence technique et les véritables potentialités des matériaux candidats pour la construction d'une couche de roulement à longue durée de vie.
- Identifier et examiner les résultats des recherches portant sur les conclusions des évaluations économiques réalisées en phase I ou les conditions physiques susceptibles d'être les plus adaptées à l'utilisation de ces matériaux en tant que couches de roulement à longue durée de vie (soutien, trafic, charges, climat).

3.2.2 *Principales questions*

Les principales questions relatives au mandat confié qui devaient être étudiées sont notamment les suivantes :

- Formulation du matériau de la couche de roulement et dimensionnement de la couche de roulement elle-même (épaisseur), afin de résister aux conditions de trafic et d'environnement, de protéger les couches inférieures de l'eau de surface et de présenter des propriétés de frottement durables, pendant toute la durée de service.
- Amélioration des performances anti-bruit et anti-éclaboussures.
- Techniques de construction : soutien de la couche de roulement à longue durée de vie, liaison avec le support (couche d'accrochage et nécessité d'une couche de liaison), conditions de mise en œuvre de la couche de roulement (questions de santé incluses) et temps de prise avant et après la réouverture à la circulation.
- Recyclage à la fin de la durée de vie.

Les recherches ultérieures sur ces éventuelles couches de roulement innovantes, à longue durée de vie, devaient être effectuées par des essais rigoureux en laboratoire et, si les résultats obtenus le justifiaient, par des essais choisis, dans des installations de chargement accéléré. Des essais en vraie grandeur, complexes, longs et coûteux n'ont pas été envisagés. Toutefois, il a été prévu que certaines mises au point de matériaux pourraient nécessiter quelques aménagements. Les essais routiers en vraie grandeur ne seraient envisagés qu'au cours de la troisième et dernière phase du projet.

3.3 Organisation de l'étude

3.3.1 Méthode de travail

Les recherches de phase II ont été réalisées par le groupe de travail, sur la base d'une coopération internationale. Les membres du groupe de travail ont été désignés par les pays membres au titre de leur expertise dans les domaines étudiés. Le groupe de travail a été constitué et ses tâches ont été coordonnées par le président et le secrétariat du CCRT. Ce dernier a également contribué à la rédaction du rapport, à l'élaboration de ses conclusions et à sa finalisation pour publication. Des précisions sur les méthodes du groupe de travail du CCRT sont apportées dans le texte référencé CEMT/OCDE/JTRC(2004)4.

Les projets des groupes de travail ont généralement une durée prévue de 18 mois, pendant lesquels trois ou quatre réunions sont habituellement organisées. Dans le cas de ce projet, comprenant des recherches initiales et des essais en laboratoire considérables, il a été admis que les travaux devraient durer plus longtemps que ce n'est le cas pour de tels groupes de travail.

3.3.2 Participation au projet

Le groupe de travail sur l'évaluation économique des chaussées à longue durée de vie - Phase II, créé pour mener à bien le projet, a été présidé par M. Jorgen Christensen (Danemark) et a compté 37 membres de 18 pays, ainsi que le secrétariat.

Les pays dont les membres du groupe de travail ont participé le plus activement et dont les laboratoires ont travaillé intensivement aux essais sont les suivants : Allemagne, Australie, Danemark, États-Unis, France, Nouvelle-Zélande, Royaume-Uni et Ukraine. Les laboratoires nationaux de ces huit pays membres ont participé aux programmes d'essais sur les couches de roulement, dirigés par des coordinateurs techniques de la Federal Highway Administration (États-Unis) et du Laboratoire central des ponts et chaussées (France).

Les pays dont les membres du groupe de travail ont participé activement ou par correspondance, mais dont les laboratoires n'ont pas réalisé d'essais, sont les suivants : Autriche, Belgique, Grèce, Italie, Japon, Pologne, Portugal, Russie, Suède et Suisse. Des réviseurs externes, venant du Canada et de Finlande, ont relu la version provisoire du rapport final.

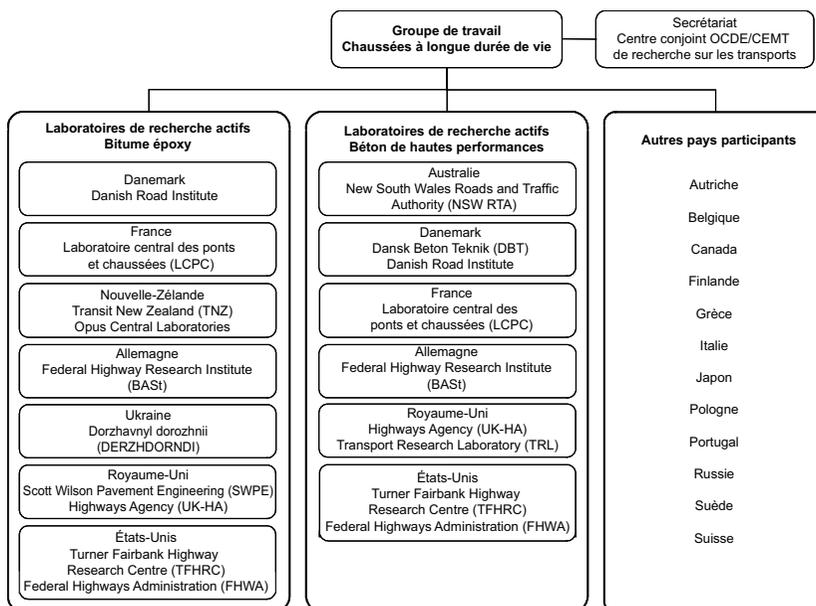
Un schéma montrant l'organisation de l'étude et la participation des pays est joint en Figure 3.1.

Une liste des participants du groupe de travail est fournie en Annexe B.

3.3.3 Résultats

Les résultats du projet devraient intéresser de nombreuses administrations routières, notamment si les essais confirment le potentiel des revêtements de *bitume-époxy* et d'*enduit hydraulique fibré gravillonné* pour améliorer la longévité des couches de roulement sur les routes à forte circulation, moyennant un coût général réduit, en termes de valeur actuelle.

Figure 3.1. L'organisation de l'étude et la participation



NOTES

1. Remarque : les coûts habituels des travaux routiers mentionnés dans les conclusions du rapport de phase I sont indiqués en USD et prennent en compte les taux de change applicables à la date de rédaction du rapport de phase I.

4. BITUME ÉPOXY : RÉALISATION ET RÉSULTATS DES ESSAIS

4.1 Introduction

L'étude de phase I a identifié deux familles de matériaux candidats susceptibles de pouvoir répondre aux exigences économiques et techniques des couches de roulement à longue durée de vie. L'une d'elles est la famille des bitumes époxy ; l'autre est la famille des bétons à hautes performances (BHP).

Ce chapitre ne porte que sur la famille des *bitumes époxy* et décrit les conclusions de phase II de ce projet, concernant les bitumes époxy testés. L'objectif de la phase II a été d'étudier le comportement et les propriétés des matériaux identifiés comme candidats et de les tester suffisamment pour évaluer leur adéquation à une utilisation en couches de roulement à longue durée de vie.

Les essais sur le bitume époxy ont été réalisés dans le cadre d'efforts conjoints de recherche impliquant un certain nombre d'organismes allemands, américains, britanniques, danois, français, néo-zélandais et ukrainiens.

Le bitume époxy est un excellent matériau. Historiquement, son coût élevé de mise en œuvre a limité son utilisation aux tabliers de ponts orthotropiques. Balala explique la raison du choix de ce liant pour le pont San Mateo à San Francisco, en 1967 [5] et Gaul rappelle que ses bonnes performances demeurent inchangées 30 ans après sa mise en œuvre [8]. Le groupe de travail sur le bitume époxy a étudié si cette longévité pourrait s'appliquer également à l'environnement routier, lorsque le matériau serait soumis à des climats plus sévères.

La démarche de recherche adoptée par le groupe de travail sur le bitume époxy a été de demander aux laboratoires participants d'identifier et d'utiliser les sources locales de bitume époxy et de comparer leurs caractéristiques et leurs performances avec celles d'un matériau de référence. Ce dernier est un *enrobé bitumineux à base de bitume et de granulats naturels* identifié par chaque laboratoire, ayant une vaste connaissance de son comportement, comme un matériau présentant un historique de performances remarquables.

Pour effectuer la comparaison, *le bitume époxy remplacerait simplement le bitume dans le matériau de référence* ; tous les autres éléments du mélange sélectionné seraient identiques. Ainsi, les teneurs en liant et en vides resteraient inchangées. Puisque le bitume époxy réagit avec le granulat, la nécessité d'envisager l'association bitume-granulat n'a pas paru importante.

Grâce à cette approche, les pays participants ont pu se centrer sur une application éventuelle du bitume époxy, avec des matériaux locaux et des procédures d'essai standard, tout en fournissant une évaluation qualitative des performances de terrain attendues. Ils ont pu ensuite communiquer les données obtenues en fonction de leur pertinence pour un matériau de revêtement à longue durée de vie et leurs implications sur la durée de service d'une chaussée.

Les performances de la chaussée susceptibles d'être problématiques (propriétés exigées pour une couche de roulement) ont été privilégiées dans cette étude.

4.2 Sélection du matériau

4.2.1 Sélection du bitume époxy

Les liants bitumineux traditionnels sont thermo-susceptibles : ils se ramollissent lorsqu'ils sont chauffés et durcissent lorsqu'ils sont refroidis. De leur côté, les époxy sont thermodurcissables : ils se solidifient et durcissent de manière définitive, lorsqu'ils ont pris. Cette propriété a eu deux conséquences importantes. Premièrement, les méthodes d'essais et les protocoles de caractérisation traditionnels ont dû être souvent modifiés pour s'adapter au comportement thermodurcissable du bitume époxy. Deuxièmement, une connaissance approfondie du mécanisme de prise s'est avérée essentielle pour obtenir des données exploitables.

Le bitume époxy est un système à deux phases, résultant de la réaction d'un agent de réticulation (phase A) avec un composant bitume / résine (phase B). Ces composants sont présentés sur la Figure 4.1, ainsi que le mélange ainsi polymérisé sur la Figure 4.2.

Figure 4.1. Deux composants du bitume époxy



Source : Turner Fairbank Highway Research Center (États-Unis).

Figure 4.2. Démonstration des caractéristiques de maniabilité



Source : Turner Fairbank Highway Research Center (États-Unis).

Les caractéristiques de maniabilité avant polymérisation sont similaires à celles du bitume traditionnel. La composition chimique de l'agent de réticulation détermine en grande partie la vitesse

de polymérisation. Le bitume donne de la souplesse au bitume époxy et influe largement sur sa sensibilité à l'oxydation et à l'endommagement par l'humidité.

Le liant ainsi réticulé possède souplesse et mémoire, comme le montre la Figure 4.3. Lorsqu'un échantillon de bitume époxy polymérisé est plié, il reprend sa forme initiale en peu de temps.

Figure 4.3. Démonstration des caractéristiques de mémoire du bitume époxy à base d'acide



Source : Turner Fairbank Highway Research Center (États-Unis).

Les pays dont les laboratoires ont participé aux travaux du groupe Bitume époxy, ainsi que les types de bitumes époxy évalués sont indiqués dans le Tableau 4.1, où figurent également quelques caractéristiques de fabrication. Sept différents bitumes époxy ont été obtenus et évalués par les laboratoires participants. Deux différents agents de réticulation ont été utilisés : la base d'amine et la base d'acide. Les bitumes époxy à base d'acide utilisés par les laboratoires participants au Danemark, aux États-Unis, aux Pays-Bas et au Royaume-Uni ont été obtenus localement, mais viennent essentiellement d'une source commune. Le pourcentage de liant époxy dans ces systèmes varie entre 15 % et 50 % du poids. Les températures de polymérisation utilisées vont de la température ambiante à 135° C.

Tableau 4.1. Systèmes bitume époxy étudiés par les laboratoires et conditions de fabrication

Laboratoire	Bitume époxy (fournisseur)	Époxy [%]	Température de malaxage	Vitesse de polymérisation
Allemagne	Base d'amine	25	130° C	Rapide
	Acide avec catalyseur	25	130° C	Modérée
	Acide sans catalyseur	25	130° C	Modérée
Danemark*	Base d'acide (Colas)	14.5	120-135° C	Modérée
États-Unis	Base d'acide (ChemCoSystem)	15	150° C	Modérée
France	Base d'amine (Viagrip® Eurovia)	41	Ambiante	Rapide
	Base d'amine (Pontalco M® Eurovia)	41	Ambiante	Modérée
Nouvelle-Zélande	Base d'acide (ChemCoSystem)	15	125° C	Modérée
Royaume-Uni	Base d'acide (Colas)	14.5	120-135° C	Modérée
Ukraine	Base d'amine (CHS-ÉPOXY)	25	130° C	Modérée
	Base d'acide (Kompozit)	21		Modérée
	Époxy-polyuréthane	20		Modérée

* Échantillons fournis par le Royaume-Uni.

4.2.2 Matériaux de référence

Les matériaux de référence sélectionnés représentent des systèmes d'enrobés bitumineux de qualité, qui ont été longuement testés ou qui possèdent un long historique de performances. Les formulations vont de la granulométrie la plus fine (béton bitumineux - BB) à la plus grenue (asphalte coulé gravillonné - SMA), et de la porosité la plus faible à la plus élevée (béton bitumineux drainant - BBDR, étudié par la Nouvelle-Zélande).

Certains détails supplémentaires concernant le laboratoire et l'historique des performances de ces matériaux sur le terrain figurent dans les annexes (voir A.1).

Les laboratoires français (LCPC) et britannique (Scott Wilson) ont étudié l'application d'un bitume époxy à deux formulations différentes. Le LCPC a utilisé une couche épaisse en béton bitumineux semi-grenu (BBSG) et un revêtement de béton bitumineux très mince (BBTM), à la macrotexture élevée. Scott Wilson a utilisé un asphalte roulé à chaud (HRA) et un asphalte coulé gravillonné (SMA) de marque déposée.

Tableau 4.2. Formulations de référence

Laboratoire	Formulation de référence et propriétés de contrôle recherchées			
	Type de formulation	Classe de pénétrabilité du liant	Teneur en liant [%]	Proportion des vides [%]
Allemagne	SMA	Grade 50-70		
États-Unis	BB	PG 70-22	5.3	7
France	BBTM	Grade 10-20	5.7	18
	BBSG	Grade 35-50	5.8	6
Nouvelle-Zélande	BBDR	Grade 80-100	4.7	20.4
Royaume-Uni	HRA	Grade 40-60	7.2	6
	SMA		6	6
Ukraine	Enrobé fermé	Grade 60-90	7	

4.3 Propriétés du liant

4.3.1 Comportement de prise

Les essais préliminaires ont porté sur les propriétés du liant, afin de se familiariser avec un liant à deux phases et de vérifier les caractéristiques de prise du bitume époxy.

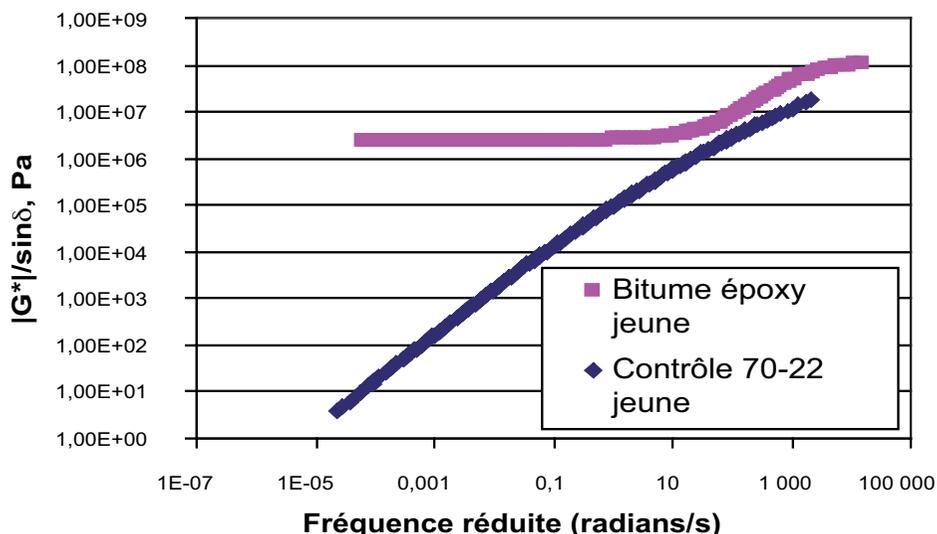
Les spécifications traditionnelles et les programmes de conditionnement associés ne sont pas adaptés à l'évaluation du bitume époxy. Dans les conditions ambiantes, le matériau non polymérisé est trop fluide, et il n'existe pas de relation entre ses propriétés avant et après polymérisation. Par ailleurs, la rigidité du liant polymérisé à base d'acide est plus proche de celle d'un plastique souple, comme le montre la Figure 4.3. En conséquence, quelques approches fondamentales et empiriques ont été développées ou adaptées pour évaluer les caractéristiques de prise des différents bitumes époxy. Une liste des méthodes employées figure en annexe A.3. Les conditions de fabrication et de polymérisation des enrobés de bitume époxy sont décrites à la section 4.4.

4.3.2 Propriétés rhéologiques

Des mesures rhéologiques ont été effectuées sur des barreaux de bitume époxy polymérisé. Les caractéristiques du bitume époxy à des températures intermédiaires et élevées peuvent être évaluées sur un rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR), avec une série de dispositifs de barres de torsion. Les données ont été générées pour plusieurs températures à l'aide d'un balayage de fréquence couvrant la gamme allant de 0.1 à 100 radians/s, à des niveaux de déformation très faibles d'environ 10^{-3} , pour obtenir une réponse viscoélastique linéaire. Les données à toutes les températures et à toutes les fréquences ont été consolidées à la température de référence de 28° C par une conversion appropriée utilisant le principe de superposition temps-température.

Les courbes maîtresses montrent que les valeurs des paramètres rhéologiques pour le bitume époxy se situent dans une gamme très différente de celle habituellement obtenue pour les bitumes traditionnels ou d'autres bitumes modifiés par des polymères. Pour avoir une idée de la différence de comportement rhéologique du bitume époxy, des comparaisons ont été effectuées entre les propriétés du bitume époxy et celles d'un bitume traditionnel non modifié à classe de pénétrabilité élevée, à savoir un matériau de contrôle américain 70-22. Les courbes maîtresses du module complexe du Superpave ($|G^*|$), divisé par le sinus du paramètre ($|G^*|/\sin\delta$) d'angle de phase (δ) en fonction des courbes maîtresses de fréquence réduite à une température de référence de 28° C pour le bitume époxy et le bitume 70-22 sont indiquées sur la Figure 4.4. On peut voir, sur ces courbes, que les valeurs du paramètre du Superpave $|G^*|/\sin\delta$ sont proches l'une de l'autre et suivent la même tendance à fréquences élevées ou à basses températures équivalentes. Tel n'est pas le cas à fréquences faibles ou à températures élevées équivalentes. Le bitume époxy conserve les valeurs du paramètre Superpave $|G^*|/\sin\delta$ élevées, même à fréquences très faibles (équivalentes aux températures élevées), ce qui indique que les bitumes époxy devraient présenter une excellente résistance à l'orniérage.

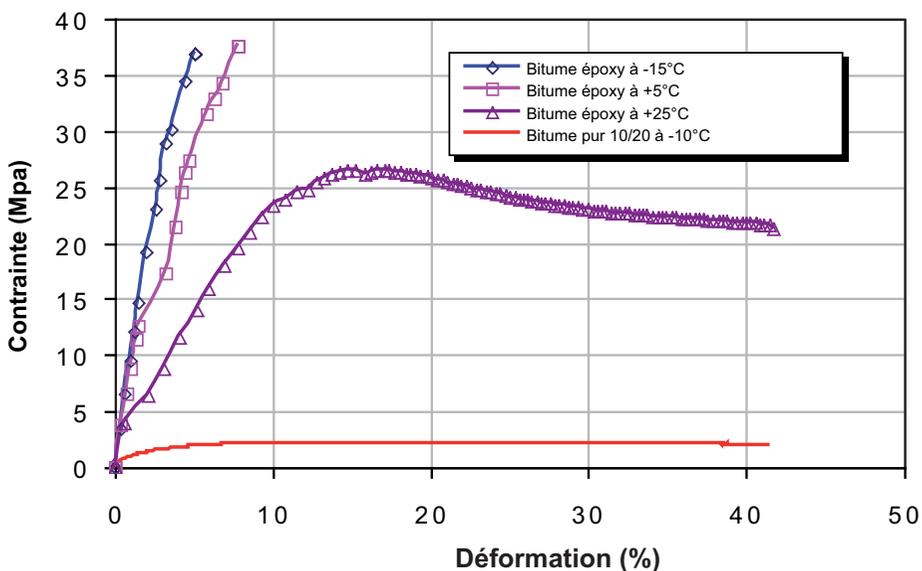
Figure 4.4. Courbes maîtresses des propriétés rhéologiques du bitume classique Superpave de grade PG70-22 et du bitume époxy à base d'acide



Source : Turner Fairbank Highway Research Center (États-Unis).

Les propriétés à basses températures des éprouvettes de bitume époxy polymérisé ont été mesurées avec un essai de fluage sur barreau (BBR) et avec l'essai de traction directe sur éprouvette H2. L'essai de fluage a été employé pour déterminer les caractéristiques rhéologiques du liant du Superpave à partir des paramètres m et S . Le bitume époxy jeune est de classe x-10, exploitable jusqu'à -10°C ou sous climat modéré. L'essai de traction directe sur éprouvette H2 a été utilisé pour mesurer les propriétés de traction d'un autre bitume époxy, contenant une teneur élevée d'époxy, qui se sont avérées 10 fois plus élevées que celles d'un liant dure de grade 10-20. Les résultats sont indiqués sur la Figure 4.5, qui montre les courbes maîtresses jusqu'au point de rupture. Ils permettent d'expliquer les valeurs relativement plus élevées, dues à la rigidité plus élevée du bitume époxy à basses températures. Les échantillons ont cependant atteint le point de rupture à des niveaux de déformation plus faibles.

Figure 4.5. Courbes contrainte-déformation du bitume époxy à base d'amine et du bitume dur à différentes températures



Source : F. Hammoum, LCPC (France).

4.3.3 Sensibilité à l'oxydation

L'utilisation des procédures de conditionnement au vieillissement à court et à moyen terme du bitume traditionnel n'est pas pertinente. Étant donné que le bitume époxy doit être utilisé en couche de roulement, l'effet de l'oxydation aux UV sur les propriétés du liant a été considéré comme déterminant. Les échantillons de bitume époxy polymérisés ont donc été conditionnés dans une enceinte d'essai au xénon Q-Panel. Les cycles de conditionnement ont comporté une exposition à la lumière UV pendant 55 minutes, puis une pulvérisation d'eau froide (5°C) pendant 5 minutes. La température de surface pendant le « cycle d'éclairage » a été de 85°C . Les éprouvettes ont été conditionnées pendant des durées de 1 jour à 16 semaines. L'examen visuel a montré que la face exposée aux UV était devenue « grise ». Il a également mis en évidence des fissures, qui ont été arrêtées en raison de la nature réticulée du système époxy. Les résultats rhéologiques sont indiqués dans les annexes (voir A.4).

4.4. Propriétés de l'enrobé

4.4.1 Fabrication

Les protocoles normalisés des fournisseurs ont été utilisés pour la fabrication de la plupart des enrobés. Les bitumes époxy à base d'acide utilisés au Danemark, aux États-Unis, aux Pays-Bas et au Royaume-Uni étant essentiellement les mêmes, les aspects de ce protocole sont indiqués ci-dessous. Certaines conditions de traitement pour les autres bitumes époxy ont été mentionnées précédemment au Tableau 4.1.

Après le mélange du liant et des granulats, une période « de prise » de 30 minutes à la température de malaxage (130° C) permet à la réaction de se poursuivre jusqu'à un certain degré, avant le compactage. Aucune difficulté n'a été rencontrée au cours de cette procédure ; les durées et les températures indiquées sont compatibles avec une utilisation dans une centrale d'enrobage traditionnelle. En ce qui concerne la maniabilité, les bitumes époxy se sont comportés de manière similaire aux matériaux témoins et n'ont exigé aucune procédure de mise en oeuvre particulière. Cependant, étant donné qu'il ne présente pas de viscosité réversible (il ne peut pas être refondu) après polymérisation, il faut admettre que le liant thermodurcissable utilisé dans les bitumes époxy rend l'enrobé plus sensible à la mise en oeuvre (aucune erreur ne peut être corrigée, après la réaction chimique).

4.4.2 Évaluation de la prise

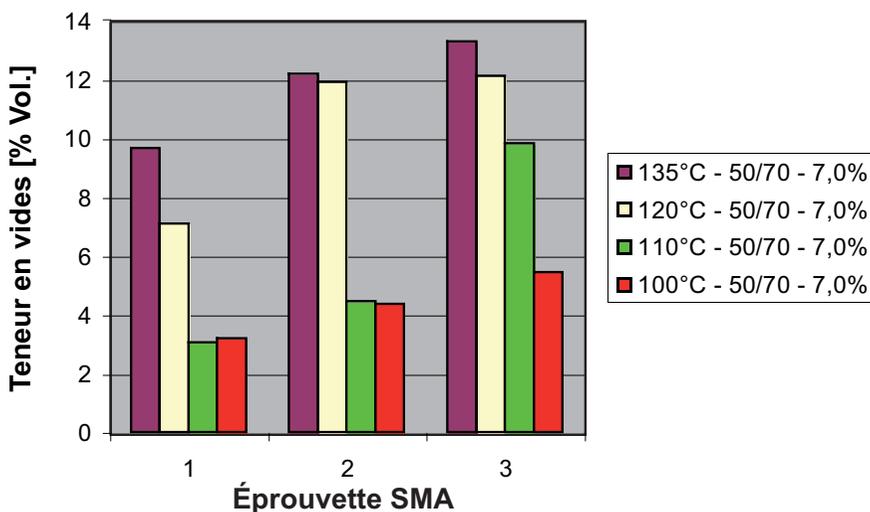
Après fabrication, les produits thermodurcissables ont pour caractéristique de poursuivre leur polymérisation et d'augmenter en résistance et en rigidité. La vitesse de polymérisation dépend de la température ambiante. Plusieurs méthodes de caractérisation pour surveiller la polymérisation ont été adoptées. Elles sont indiquées au Tableau 4.3 et peuvent essentiellement être classées en trois catégories.

Tableau 4.3 Méthodes d'évaluation des caractéristiques de prise des bitumes époxy

Laboratoire	Méthode de caractérisation	Propriété mesurée	Durée /température de polymérisation de l'éprouvette
Allemagne	Compactage de la dalle	Teneur en vides	30 min / 100°-135° C
	Test d'orniérage en conditions humides	Profondeur d'orniérage	0-60 min / 135° C
France	Module en traction directe	Module	3 jours - 1 mois / température ambiante
Nouvelle-Zélande	Module en traction indirecte	Module	0-300 heures / 85° C
Royaume-Uni	Rhéomètre à cisaillement dynamique sur mastic	Module complexe	1-80 jours / 20° C
	Module en traction indirecte	Module	
Ukraine	Essai de résistance à la compression	Module	1-28 jours / 20° C
	Orniéreur	Profondeur d'orniérage	

La première méthode consiste à évaluer l'effet de la durée de prise sur la maniabilité. Des chercheurs allemands de la Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ont évalué la teneur en vides et la résistance à l'orniérage des dalles pour déterminer la pertinence des caractéristiques de prise d'un bitume époxy donné. Le bitume époxy amine prend trop rapidement et la compactabilité de l'enrobé non compacté devient un problème. À des températures de polymérisation plus élevées, la teneur en vides augmente, de même que la profondeur d'orniérage des dalles testées (voir Figure 4.6.).

Figure 4.6. Teneur en vides des dalles de bitume époxy, à différentes températures de malaxage



Source : Federal Highway Research Institute (BASt) (Germany).

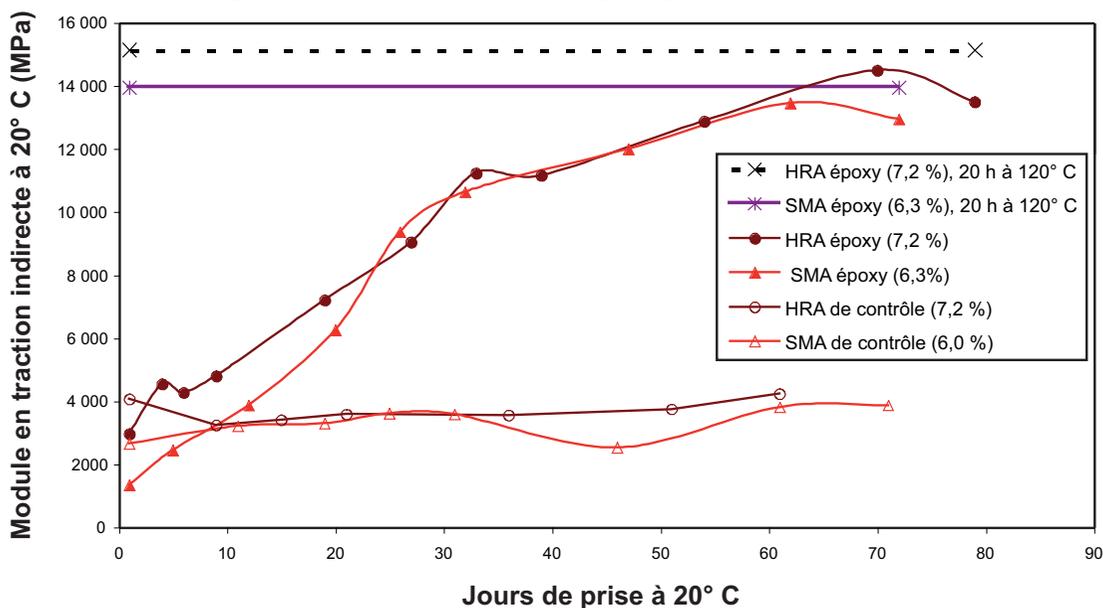
La deuxième méthode consiste à déterminer les propriétés du bitume époxy entièrement polymérisé ou propriétés à long terme. Pour ce faire, les bitumes époxy ont été polymérisés à 85° C pendant 120 heures. L'augmentation du module après un chauffage de 300 heures a été faible, ce qui indique que la prise était effectivement achevée après 120 heures. Par comparaison, le module des éprouvettes de contrôle a augmenté de 840 MPa (immédiatement après fabrication) à 2 500 MPa (après la période de chauffage de 120 heures). Ainsi, l'utilisation de températures élevées permet de vérifier que certains critères sont remplis et d'effectuer un contrôle qualité de la fabrication du bitume époxy. Cependant, il est possible qu'une polymérisation à température élevée ne reflète pas la réalité.

La troisième méthode, adoptée par les chercheurs au Royaume-Uni et en Ukraine, consiste à démontrer que la réaction chimique se produit de manière satisfaisante, à des températures plus réalistes. Les essais de stabilité Marshall et des essais de simulation du trafic ont été effectués sur des échantillons de bitume époxy après conditionnement à température ambiante (20° C) pendant 24 heures, pour reproduire le jeune âge ou le vieillissement sur le terrain à court terme, et pendant des périodes plus longues, pour établir les propriétés « à long terme ».

Au Royaume-Uni, les chercheurs ont surveillé la rigidité des enrobés HRA et SMA sur une période de 70-80 jours. Comme le montre la figure 4.7, l'enrobé HRA époxy présente une rigidité initiale plus élevée que l'enrobé SMA époxy, mais vers le 25^e jour de polymérisation, les deux enrobés présentent une rigidité similaire. Les niveaux de rigidité des deux matériaux sont comparables entre le 25^e jour et

le 60^e jour. La rigidité maximale de 14 500 MPa (HRA) et de 13 500 MPa (SMA) est atteinte vers le 60^e-70^e jour. Elle est comparable à celle obtenue après un conditionnement à 120° C pendant 20 heures et après un conditionnement à 85° C pendant 120 heures. Cette dernière procédure a été employée par les chercheurs aux laboratoires Turner Fairbank et Scott Wilson pour simuler le mûrissement à long terme des enrobés bitumineux. Elle est considérée comme un compromis acceptable pour accélérer le durcissement dans des délais raisonnables, sans entraîner de modifications irréalistes des propriétés de l'enrobé, en raison d'une température élevée. Son utilisation a été adoptée dans la présente étude.

Figure 4.7. Résultats du module en traction indirecte pour les bitumes HRA et SMA époxy polymérisés à 20° C



Source : Richard Elliott, Scott Wilson Pavement Engineering (United Kingdom).

4.4.3 Déformation permanente à température élevée

Résistance à la déformation permanente

Les chercheurs de Scott Wilson ont découvert qu'à l'état « non polymérisé », les matériaux HRA et SMA époxy avaient une résistance à la déformation au moins comparable à celle des matériaux de contrôle. Cela indique que la résistance à l'orniérage au jeune âge des enrobés époxy ne serait pas différente de celle des enrobés bitumineux standard. Toutefois, cette évaluation est compliquée par le fait que les essais pour déterminer la résistance à la déformation ont été effectués à température élevée et que les échantillons ont dû être conditionnés pendant quelques heures à cette température d'essai élevée avant d'être testés. Ce conditionnement produit inévitablement une petite accélération de la polymérisation. L'importance de ce phénomène semble relativement faible en termes de risque d'orniérage au jeune âge. Néanmoins, cette question a été réévaluée pendant les essais de charge accélérés et est abordée à la section 4.7.

À l'état de polymérisation complète, les matériaux HRA et SMA époxy offrent une résistance à la déformation, à 40° C (essai de fluage répété) et à 60° C (essai d'orniérage), entre 2 et 8 fois supérieure à celle des matériaux témoins. Cela indique une amélioration majeure de la résistance à l'orniérage par rapport aux enrobés bitumineux standard. Les bitumes époxy ne montrent pratiquement aucune déformation à l'essai d'orniérage. Avec de tels résultats, ces matériaux seraient considérés comme aptes à l'utilisation sur la plupart des sites subissant des contraintes élevées et nécessitant une résistance très élevée à l'orniérage, sur le réseau primaire britannique (charge d'au moins 135 millions d'essieux standard [essieu 80 kN] ou TMJA de 80 000 dans les deux sens), où le pourcentage de poids lourds est de 15 %.

La conclusion générale de ces travaux sur la résistance à la déformation est qu'il existe peu de risques d'orniérage lorsque le revêtement de bitume époxy est placé sur un support de bonne qualité. Les résultats de l'essai de performance simple sur le BB, figurant dans les appendices (voir A.5) le confirment.

4.4.4 Endommagement par l'humidité

Résistance à la traction et à l'endommagement par l'humidité

En laboratoire, il n'existe pas de méthode d'essai universelle pour déterminer la sensibilité à l'eau d'un matériau bitumineux en service. Cependant, on sait depuis quelques temps que la perte de liaison due à l'eau semble plus facilement mesurable avec des essais de type traction. Pour la résistance à la traction, Lottman (1982) a suggéré une valeur seuil de « résistance » retenue de 70 % pour déterminer si un enrobé était sensible à l'eau. Par ailleurs, les spécifications du programme américain stratégique de recherche routière (SHRP) recommandent un rapport de résistance à la traction indirecte retenue de 80 %. L'utilisation de cette procédure a été adoptée dans la présente étude (au laboratoire Scott Wilson).

La procédure d'essai nécessite deux ensembles d'éprouvettes (sous-ensembles d'éprouvettes sèches et conditionnées) avec types et volumes d'enrobé similaires. La résistance à la traction indirecte retenue est calculée en fonction de la résistance à la traction indirecte moyenne des sous-ensembles d'éprouvettes conditionnées, par rapport à celle des sous-ensembles d'éprouvettes sèches. Le conditionnement à l'humidité est effectué en soumettant les éprouvettes à la saturation sous vide, suivie d'un cycle de gel-dégel et d'autres cycles de conditionnement à la température.

À l'état « non polymérisé », les matériaux HRA et SMA époxy offrent une résistance à la traction comparable, à 25° C, à celle des matériaux témoins. Cela indique que la résistance à la traction au jeune âge des enrobés époxy ne serait pas différente de celle des enrobés bitumineux standard. À l'état de polymérisation complète, les matériaux HRA et SMA époxy offrent une résistance à la traction, à 25° C, jusqu'à 3 fois supérieure à celle des matériaux témoins.

En ce qui concerne la résistance à l'humidité, les matériaux au bitume époxy ne semblent pas sensibles aux dommages dus à l'eau, même au jeune âge (c'est-à-dire avant la fin du processus de durcissement chimique), selon le critère de 80 % de résistance à la traction retenue, formulé par le SHRP. Pour évaluer davantage la résistance à l'humidité de ces matériaux, un vaste protocole d'essais a été élaboré. Il comprenait six cycles de gel-dégel (un seul cycle exigé dans la procédure SHRP). À la fin des essais, l'enrobé HRA époxy a offert une meilleure résistance à la traction retenue que l'enrobé témoin, tandis que l'enrobé SMA époxy a affiché une performance comparable, bien que bonne, à celle de l'enrobé témoin.

Les autres méthodes d'évaluation de l'endommagement par l'humidité comprennent l'utilisation « de tests dans les conditions extrêmes », tels que le test d'orniérage en conditions humides et l'essai à l'orniéreur de Pine Instrument Company. Ces essais sont subjectifs, mais s'avèrent d'excellents outils de détection lorsqu'ils sont correctement étalonnés avec des échantillons sur le terrain. Tous deux montrent les performances sensiblement meilleures des bitumes époxy par rapport aux matériaux témoins. Des précisions sont apportées dans les annexes (voir A.5).

4.4.5 Rupture - Fatigue

Résistance à la fatigue

Par prudence, les ingénieurs ont traditionnellement établi deux types de dégradation pouvant influencer sur les performances des chaussées souples : la *fissuration par fatigue* dans la couche de base bitumineuse et l'*orniérage structurel* dû à la déformation de la couche de fondation. Pour les chaussées routières « courantes » à couche de liaison, la déformation à la traction « de conception », liée à la fissuration par fatigue, à la base des couches de liaison, sous une charge mobile, peut être évaluée entre 30 et 200 microdéformations.

Étant donné que la *fatigue* est un phénomène habituellement lié à l'état de service, les essais de fatigue dans la présente étude n'ont été effectués que sur des échantillons âgés. Les chercheurs de Scott Wilson ont découvert que la durée de vie en fatigue (à la traction indirecte) des enrobés époxy était toujours supérieure à celle des enrobés témoins, pour la résistance à la traction « de conception ». En effet, la durée de vie en fatigue des bitumes HRA et SMA époxy s'est avérée au moins 10 fois supérieure à celle des bitumes témoins, pour ce niveau de déformation.

Sur les chaussées souples, épaisses et bien construites, la dégradation observée est essentiellement constituée d'un orniérage superficiel (bitumineux) et d'un amorçage de fissures superficielles. Toute amélioration du *comportement en fatigue* permettrait une meilleure résistance à la fissuration de haut en bas, induite par le trafic. En outre, il convient de remarquer qu'avec des effets localisés, la déformation à l'interface pneu-route pourrait être beaucoup plus élevée que celle située à la base des couches de liaison. En effet, lorsque de minces couches supérieures de matériau bitumineux sont répandues sur des chaussées en béton, si les températures sont basses ou s'il se produit un mouvement de terrain, le déplacement peut être accentué.

Il est donc utile de comparer également les résultats sous déformation élevée. On a observé que le meilleur comportement en fatigue de l'époxy, par rapport aux matériaux témoins, n'était alors que marginal. Il a donc paru important d'évaluer les performances des bitumes époxy en conditions de déformation élevée, dans une installation de chargement accéléré (comme indiqué à la section 4.6). Il conviendrait également d'évaluer en laboratoire d'autres caractéristiques de fatigue, comme celles mentionnées à l'appendice A.5, selon d'autres schémas d'essai, par exemple, l'essai de flexion de poutre quatre points.

4.4.6 Essais de rupture directe et de fissuration à basse température

Résistance à la fissuration thermique

Les performances à basse température du bitume époxy ont été évaluées au laboratoire Scott Wilson à l'aide d'un simple essai de flexion, effectué aux basses températures généralement observées

au Royaume-Uni (5° C). Les résultats ont montré que les enrobés au bitume époxy avaient une meilleure résistance et une meilleure ténacité après vieillissement, mais une ductilité et une flexibilité réduites, par rapport aux enrobés témoins. Ce comportement est conforme aux caractéristiques de déformation élevées, prédites par les données de fatigue. Il pourrait limiter les applications du bitume époxy dans la pratique, à des chaussées possédant des couches de fondation rigides, par exemple, afin de réduire le niveau de déflexion (ou de déformation en traction) à l'intérieur du matériau.

Quelques essais innovants de caractérisation en laboratoire sur la fissuration à basse température ont été réalisés pour évaluer le bitume époxy et sont présentés dans les annexes (voir A.5).

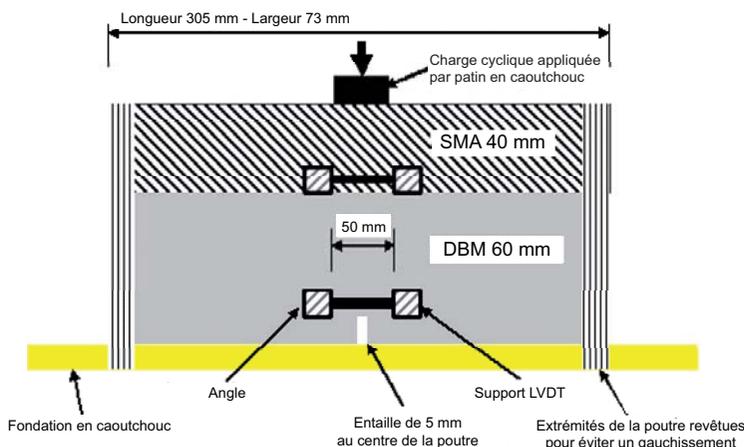
4.5 Essais composites

Les précédents essais ont simulé les contraintes et les déformations subies par l'enrobé dans une section ou un tronçon de chaussée. L'étape suivante a consisté à évaluer les performances d'une couche de bitume époxy sur des couches de base souples et rigides. Ces simulations de chaussée à petite échelle peuvent fournir des renseignements sur le comportement lors d'essais accélérés en vraie grandeur ou sur des routes réelles. En effet, des dommages tels que la remontée de fissures et la délamination de la couche peuvent être évalués plus facilement en laboratoire ; la remontée de fissures n'a pas été prévue au programme des essais de charge accélérés.

4.5.1 Essais avec couche de base en bitume

Les performances de l'époxy sur couche de base souple ont été évaluées et comparées avec celles du matériau témoin. Les chercheurs de Scott Wilson ont tenté d'évaluer le comportement en flexion et en fatigue de poutres composites, ainsi que les caractéristiques de décollement des couches. Le schéma de l'essai est illustré sur la Figure 4.8.

Figure 4.8. Schéma d'essai des systèmes composites souples



Source : Richard Elliott, Scott Wilson Pavement Engineering (United Kingdom).

Un revêtement en asphalte coulé gravillonné (SMA) de 40 mm a été compacté sur une couche de base en enrobé bitumineux dense (DBM) de 60 mm, à l'aide d'un compacteur à rouleau. Une couche de liaison a été utilisée dans tous les cas. Les dalles composites ont été coupées pour former les poutres d'essai et l'essai de contrainte imposée a été effectué à l'aide d'un vérin de chargement hydraulique. Les éprouvettes ont été entaillées et deux LVDT ont été fixés sur la ligne médiane de chaque poutre, un à la base de la poutre composite et un juste au-dessus de l'interface, comme le montre la Figure 4.9.

Figure 4.9. Configuration de l'éprouvette testée



(a) Bitume traditionnel sur base DBM



(b) Bitume époxy sur base DBM

Source : Richard Elliott, Scott Wilson Pavement Engineering (United Kingdom).

À tous les niveaux de chargement appliqués, les performances des poutres revêtues de bitume époxy à base d'acide ont été bien supérieures à celles des poutres de contrôle, en termes de déformation de fluage cumulée, de propagation de fissures et d'endommagement général.

Deux méthodes ont été adoptées pour évaluer la délamination de la couche.

La première méthode est l'essai de cisaillement selon Leutner, qui a été réalisé sur des carottes de dalles composites constituées de revêtements HRA et SMA.

L'essai avec l'appareil photographié sur la Figure 4.10 a été réalisé à 5° C, 20° C et 40° C. Dans tous les cas, la rupture photographiée sur la Figure 4.11 s'est située à l'interface entre la couche de surface et la couche de base.

La résistance de la couche de liaison semble être le facteur déterminant. En conséquence, rien n'indique que l'enrobé au bitume époxy se comporte mieux ou moins bien que l'enrobé témoin.

Figure 4.10. Appareil d'essai Leutner



Source : Richard Elliott, Scott Wilson Pavement Engineering (United Kingdom).

Figure 4.11. Aspect de l'éprouvette après essai de cisaillement Leutner

(a) SMA de contrôle
(40-60) sur DBM (100/150)



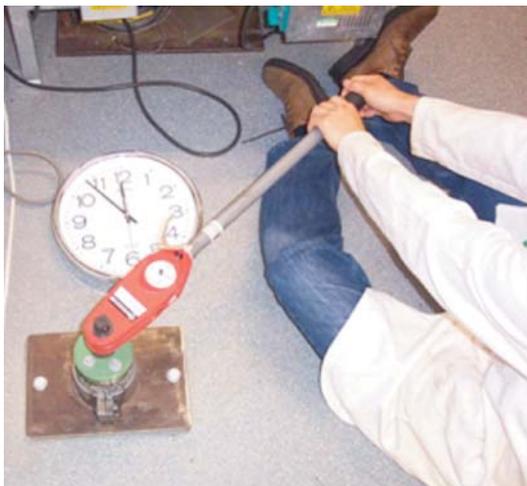
(b) SMA époxy
sur DBM (100-150)



Source : Richard Elliott, Scott Wilson Pavement Engineering (United Kingdom).

La deuxième méthode est l'essai de couple, dans lequel une éprouvette est fixée au-dessous de l'interface testée à l'aide d'un dispositif de préhension solidaire. Une plaque d'acier est collée à la surface supérieure de l'éprouvette avant l'essai. Une clé dynamométrique est fixée à la plaque et un couple est appliqué jusqu'à rupture de l'éprouvette. Le couple maximum est enregistré. Un exemple d'essai de couple manuel en cours de réalisation est photographié sur la Figure 4.12.

Figure 4.12. Essai de couple manuel en cours de réalisation



Source : Richard Elliott, Scott Wilson Pavement Engineering (United Kingdom).

Une série d'essais de couple a été réalisée à 20° C et 40° C. Dans presque tous les cas, la rupture s'est produite dans la couche d'enrobé bitumineux dense à module moins élevé. Des exemples d'éprouvettes fracturées sont photographiés sur la Figure 4.13. Ces résultats étaient plus ou moins attendus, puisque la couche d'enrobé bitumineux dense avait été fabriquée avec un liant à classe de pénétrabilité 100-150. Malheureusement, il est impossible de déterminer si les enrobés au bitume époxy se sont mieux ou moins bien comportés que les enrobés témoins.

Figure 4.13. Aspect du plan de rupture du SMA (époxy) sur DBM (100-150)

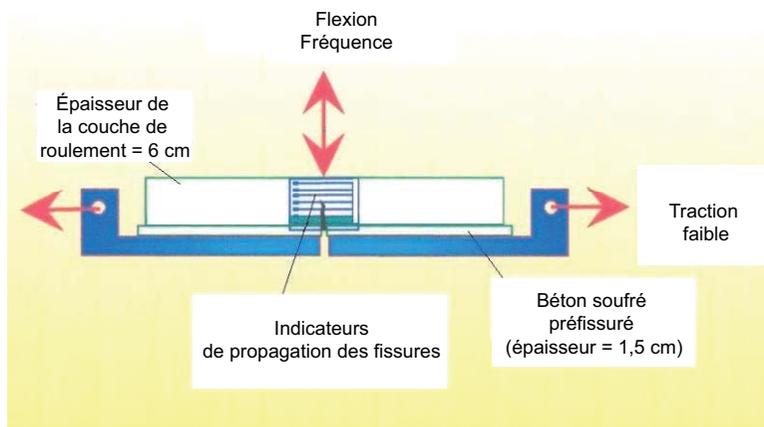


Source : Richard Elliott, Scott Wilson Pavement Engineering (United Kingdom).

4.5.2 Essais avec couche de base en béton

Deux méthodes ont été adoptées concernant le bitume époxy sur couche de base rigide. Le LCPC a évalué la résistance à l'amorçage de fissures et à la propagation de la rupture dans une couche épaisse en béton bitumineux semi-grenu (BBSG) sur couche de base en béton. Lors de ces essais, le bitume époxy à base d'amine a été comparé au bitume 35-50. Un schéma de l'appareil d'essai de fissuration thermique est illustré, avec les conditions de chargement, à la Figure 4.14.

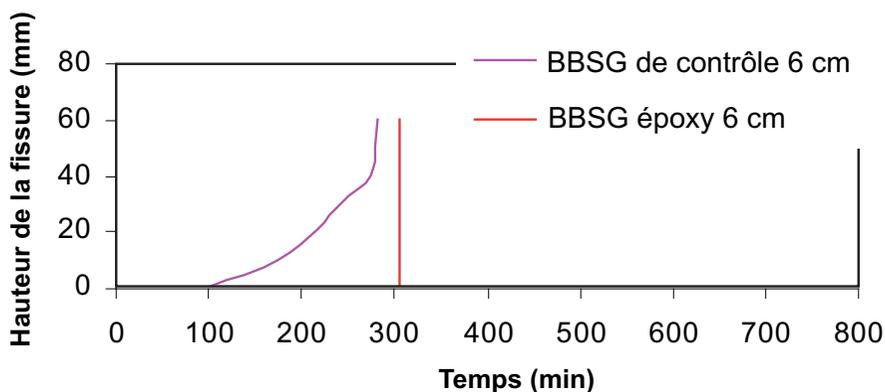
Figure 4.14. Schéma de l'appareil d'essai français



Source : N. Vulcano-Greullet, LRPC Autun (France).

Une dalle (130 x 590 x 80 mm) de béton bitumineux semi-grenu (BBSG) est collée à une couche de béton entaillée. La dalle est soumise à une charge en déformation imposée et à une charge en traction. Les résultats de l'enrobé au bitume témoin et de l'enrobé au bitume époxy à base d'amine, testés à 5° C, sont indiqués sur la Figure 4.15. La fissuration du bitume témoin a été amorcée au bout de 100 min et s'est propagée jusqu'à rupture définitive, au bout de 280 min. Le bitume époxy est sensiblement plus résistant à l'amorçage de fissures mais, une fois que celles-ci sont amorcées, elles se propagent très rapidement.

Figure 4.15. Propagation de fissures sur échantillons de bitumes témoins et époxy, pendant l'essai de fissuration thermique



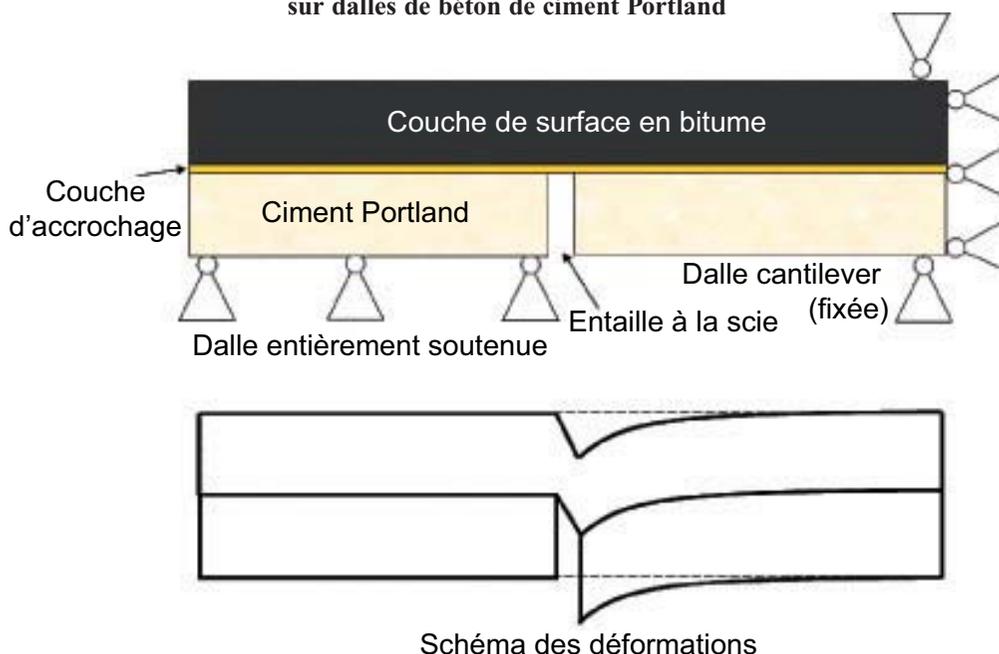
Source : N. Vulcano-Greullet, LRPC Autun (France).

Le centre Turner Fairbank (TFHRC) a testé trois enrobés sur couche de base en béton. L'enrobé fermé de référence, décrit plus haut, avec le liant bitumineux non modifié de contrôle et le liant bitume époxy, et un enrobé de bitume-caoutchouc avec granulats à granulométrie discontinue et caoutchouc granulaire mélangé au liant de base, par le procédé humide de l'État d'Arizona. Ce dernier enrobé s'était bien comporté par rapport aux autres enrobés de référence lors de précédents essais de charge accélérés et dans le protocole d'essai de performance simple (voir appendice A, Figure A.5.1).

Un schéma de l'installation d'essai de contrainte imposée est illustré sur la Figure 4.16. L'orniéreur français, utilisé sur une dalle composite, est photographié sur la Figure 4.17. Cet orniéreur a été employé pour appliquer des charges de roues répétées et alternatives. La pression de gonflage des roues était de 100 livres par pouce carré (100 psi) et la charge des roues était calibrée à 1 200 livres (lbs). Un mélange de béton de ciment Portland traditionnel a été coulé dans un moule de bitume sur une épaisseur de 40 mm et curé dans une enceinte climatique chaude et humide. La résistance à la compression du mélange était supérieure à 30 000 livres par pouce carré (30 000 psi). La surface de la dalle de ciment Portland a été finie à la main, à l'aide d'une truelle. Aucune finition ni texture de surface n'a été employée.

Les dalles de béton de ciment Portland curées ont été enlevées, puis replacées dans les moules pour placer la couche d'enrobé bitumineux. Le liant bitume époxy a été utilisé comme couche d'accrochage, entre les couches d'enrobé bitumineux et de béton. Le béton bitumineux non compacté a été placé dans

Figure 4.16. Schéma de l'essai composite des bitumes époxy et de référence sur dalles de béton de ciment Portland



Source : Turner-Fairbank Highway Research Centre (États-Unis).

Figure 4.17. Essai composite de dalle à l'orniéreur français



Source : Turner-Fairbank Highway Research Centre (États-Unis).

le moule au-dessus du ciment Portland, puis répandu et compacté à l'aide d'un compacteur à pétrissage linéaire, pour obtenir une teneur en vides d'environ 7 % dans l'enrobé bitumineux. Les dalles composites ont ensuite été refroidies. Une scie à eau diamantée a permis de pratiquer une entaille à la scie dans le béton de ciment Portland, au centre de la dalle composite.

La dalle a été posée dans l'orniéreur, afin de créer une fissuration ou un cisaillement en mode II (l'ouverture et la fermeture de fissures ou de joints thermiques correspondent au mécanisme de mode I). Une moitié de la dalle était entièrement soutenue. L'autre moitié était fixée à une extrémité et non soutenue au niveau de l'entaille, pour simuler un type de déformation cantilever.

Le nombre de cycles jusqu'à la propagation complète des fissures dans la couche d'enrobé bitumineux a été enregistré. L'enrobé ouvert de bitume-caoutchouc a rompu en moins de 100 cycles. Ce phénomène a été surprenant, car le liant s'était extrêmement bien comporté lors de précédents essais de charge accélérés.

L'enrobé fermé de référence a rompu au bout d'environ 1 600 cycles. Sur l'enrobé fermé de bitume époxy, la fissuration ne s'est pas amorcée ni propagée. Le seul dommage visible a été la délamination à proximité du joint à la scie.

Les résultats des trois différentes études de propagation de fissures simulant des couches de base rigides et souples suggèrent que les bitumes époxy offrent une meilleure résistance à l'amorçage de fissures. La nature réticulée du système époxy résiste à la propagation des fissures, mais une fois que les liaisons sont rompues, elles ont peu de chances de se ressouder.

4.6 Essais de fragilisation

L'essai Cantabro [9] a été utilisé pour mesurer la cohésion de l'enrobé sur éprouvettes BBDR vieilles et non oxydées. Il est basé sur l'essai d'abrasion Los Angeles, illustré sur la Figure 4.18. Des carottes de l'enrobé compacté sont malaxées dans un tambour en acier pendant 300 tours, à 30 tr/min.

Figure 4.18. **Dispositif Cantabro (abrasion Los Angeles)**



Source : Phil Herrington, Opus Central Laboratories (Nouvelle Zélande).

Le poids des granulats perdus en raison de l'abrasion a été enregistré en pourcentage du poids initial. L'état des éprouvettes avant et après l'essai est illustré sur la Figure 4.19.

Les éprouvettes de contrôle et époxy ont été oxydées par chauffage à 85° C pendant 38 jours, afin de simuler approximativement sept ans de vieillissement sur le terrain de revêtements BBDR en Nouvelle-Zélande [9].

Figure 4.19. **Éprouvettes d'enrobé avant (à gauche) et après (à droite) l'essai Cantabro**



Source : Phil Herrington, Opus Central Laboratories (Nouvelle Zélande).

Le module moyen des éprouvettes BBDR époxy polymérisé (120 heures à 85° C) a été de 4 300 MPa et celui des éprouvettes de contrôle, de 840 MPa. Le module de l'époxy non polymérisé a été inférieur (570 MPa), mais encore comparable à celui du matériau témoin. Après oxydation, le module de l'époxy s'est élevé à 7 000 MPa et celui du matériau témoin, à 4 000 MPa. Les résultats de l'essai Cantabro sont indiqués au Tableau 4.4.

Tableau 4.4. **Résumé des résultats de l'essai Cantabro**

Enrobés	Perte de masse en pourcentage (% ± 95 % limites de confiance)			
	10° C		25° C	
	Masse initiale	Masse après oxydation (909h, 85° C)	Masse initiale	Masse après oxydation (909h, 85° C)
Époxy (polymérisé)	14.9 ± 4.6	17.6 ± 4.6	16.2 ± 3.2	13.0 ± 2.7
Contrôle	53.2 ± 5.2	72.1 ± 7.7	16.5 ± 3.0	30.6 ± 4.2

Malgré le module élevé de l'enrobé au bitume époxy polymérisé, les résultats de l'essai Cantabro sur l'enrobé non oxydé sont comparables à ceux de l'enrobé témoin à 25° C et sensiblement meilleurs à 10° C. Après oxydation, les pertes de masse à 10° C et 25° C sont bien inférieures à celles de l'enrobé témoin. En fait, quelles que soient les conditions mises en œuvre, les éprouvettes d'époxy ne sont pas, pour l'essentiel, modifiées par la température ou l'oxydation.

D'un point de vue cohésion des matériaux, ces résultats suggèrent une durée de vie sur le terrain sensiblement plus longue pour le BBDR époxy que pour le matériau standard.

4.7 Essais de chaussée accélérés

4.7.1 Essais au laboratoire TRL

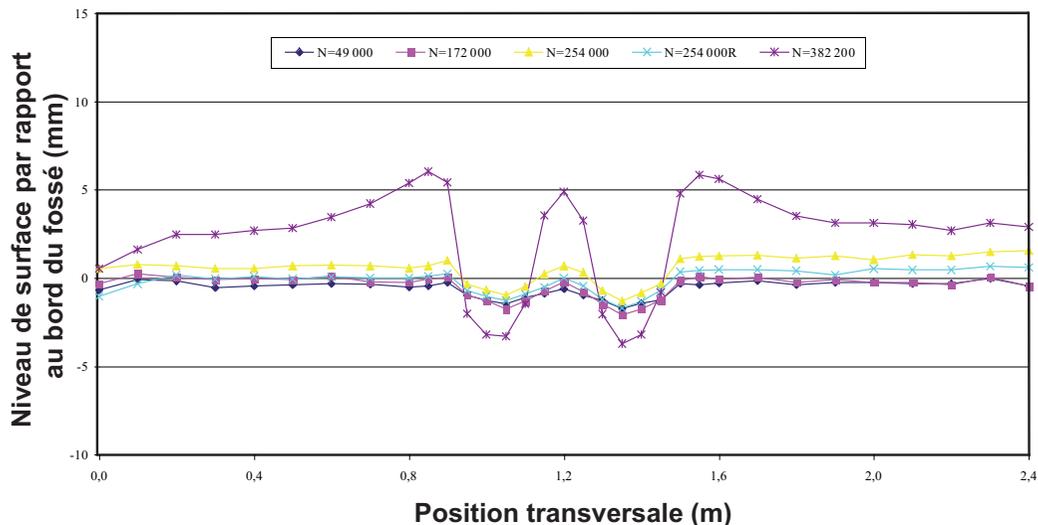
Les sections d'essai ont été mises en œuvre dans l'installation d'essais de chaussée du laboratoire TRL, pour déterminer les performances des revêtements de bitume époxy et de béton à hautes performances sous l'action du trafic. Une troisième section utilisant un revêtement standard, un matériau de revêtement mince de marque déposée, à savoir un asphalte coulé gravillonné, commercialisé sous l'appellation Masterpave, a été mise en œuvre en tant que section témoin. L'essai a consisté à simuler un trafic sur les trois sections, correspondant à une charge de 1 million d'essieux standard à 20° C, puis à appliquer une charge supplémentaire de 0.5 million d'essieux standard à 35° C. Les résultats sont indiqués sur la Figure 4.20, pour différents nombres de passages. D'autres précisions concernant l'essai et l'installation sont apportées au chapitre 5.

Les sections mises en œuvre avec des enrobés en bitume époxy et de contrôle ont offert une résistance à l'orniérage similaire, sous une charge à 20° C. Les deux sections ont présenté un orniérage, sous une charge à 35° C. La section en bitume époxy a offert la meilleure résistance (voir Figure 4.21.).

La majeure partie de l'orniérage sur la section en bitume époxy s'est produite dans la couche sous-jacente, construite en enrobé bitumineux dense de classe 125. Une fissuration longitudinale intermittente a été observée dans les traces de roues de la section en bitume époxy, dues au trafic canalisé.

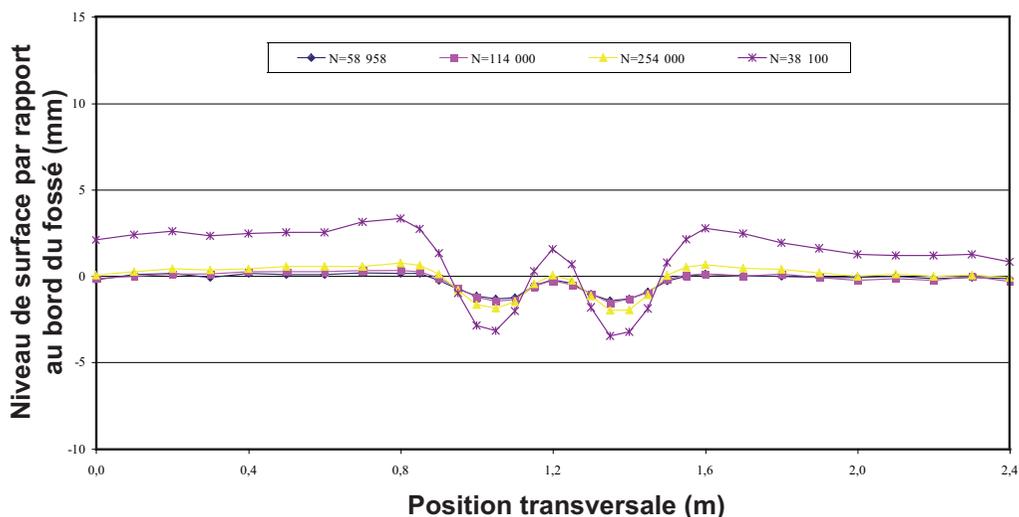
Ces résultats suggèrent que pour une nouvelle construction, le bitume époxy doit être placé sur une couche plus rigide ou que la couche sous-jacente doit être exposée à l'air ambiant pour permettre un durcissement oxydatif.

Figure 4.20. Profil de surface - Contrôle Masterpave (section 2)



Source : Transport Research Laboratory (TRL) Ltd. (Royaume Uni).

Figure 4.21. Profil de surface - Bitume époxy (section 3)



Source : Transport Research Laboratory (TRL) Ltd. (Royaume Uni).

4.7.2 Installation sous abri d'essais de chaussée accélérés de Canterbury (CAPTIF)

CAPTIF est une piste d'essai circulaire sous abri non chauffée, de 58 m de longueur (sur la ligne médiane), située à Christchurch (Nouvelle-Zélande). Une série d'essais sur le BBDR époxy a été menée pour évaluer les performances au jeune âge, ainsi que toutes difficultés pratiques liées à la fabrication et à la construction du matériau en vraie grandeur.

Les essais ont porté sur des sections adjacentes (de contrôle et BBDR époxy), chacune de 6 m de longueur, de 2 m de largeur et de 30-35 mm d'épaisseur. Les BBDR ont été mis en œuvre sur une piste en enrobé fermé de 200 mm d'épaisseur. Une couche d'accrochage en émulsion de bitume modifié au polymère SBS (environ 0.63 L/m²) a été appliquée et a pu rompre avant la mise en œuvre des BBDR. Les températures pendant le compactage ont été respectivement de 80°-94° C et de 75°-80° C pour les enrobés époxy et de contrôle. Aucun problème de mise en œuvre ou de compactage des BBDR époxy n'a été observé ; le comportement et l'aspect de ce dernier ont été identiques à ceux du matériau de contrôle. Aucune fumée ni odeur n'ont été observées.

En raison des contraintes de temps, il n'a pas été possible de simuler un trafic sur les BBDR époxy sur une durée de polymérisation de plusieurs mois. Cependant, la polymérisation a été accélérée à l'aide de radiateurs, en maintenant une température moyenne de surface de 29.7° C, sur une période de 13 jours.

La vitesse de polymérisation du BBDR époxy a été contrôlée en mesurant le module de blocs cylindriques (Marshall) d'un diamètre de 100 mm, préparés au moment de la construction et placés à la surface des sections d'essai. Au bout de 13 jours, lorsque la simulation du trafic a commencé, le module du BBDR époxy avait atteint environ 57 % de sa valeur de 3 909 Mpa, à l'état de polymérisation complète.

198 000 passages de roues ont été réalisés sur les sections d'essai, pendant une période de trois semaines. Une charge de 40 kN a été appliquée sur chaque série de roues (équivalant à une charge par essieu de 8.2 tonnes). Après 175 000 passages, les pneus ont été orientés selon un angle de 1.5° par rapport à la tangente pour augmenter la résistance superficielle. La température de surface pendant la simulation du trafic a été de 12.1° C en moyenne.

Visuellement, le BBDR en bitume époxy n'a pas paru modifié par le trafic. En revanche, la section témoin, bien que peu endommagée, a perdu une quantité significative de gravillons à la surface, sur les points situés le long des traces de roues.

Aucune section n'a présenté d'orniérage excessif, après 198 000 passages. Sur la section témoin, l'orniérage a augmenté constamment avec le trafic (jusqu'à 4.3 mm), tandis que sur la section en bitume époxy, il s'est stabilisé après environ 60 000 passages (à environ 2.5 mm). Ce résultat reflète probablement le fait que le BBDR n'était que partiellement polymérisé, lorsque la simulation du trafic a commencé. En conditions réelles, les véhicules circuleront sur un bitume époxy pour l'essentiel non polymérisé. Il n'y a cependant aucune raison de supposer que l'orniérage du bitume époxy au jeune âge sera plus sévère que celui des enrobés bitumineux standard équivalents : les modules du BBDR époxy non polymérisé et du BBDR témoin sont comparables (voir section 4.6).

La résistance initiale à l'orniérage, dans les traces de roues, a été comparable sur les deux sections. Cette observation montre que le bitume époxy n'est pas par nature plus glissant que le bitume traditionnel. Après 198 000 passages, l'adhérence sur la section en époxy, bien qu'encore acceptable dans la pratique, avait diminué légèrement, tandis que sur la section témoin, elle avait augmenté au-delà

de sa valeur initiale. Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que, sur la section en BBDR époxy, le liant était d'une certaine manière « poli » à la surface des granulats, ce qui a entraîné une réduction de l'adhérence, alors que sur la section témoin, l'enrobé était usé à la surface des granulats. Cependant, l'aspect visuel des matériaux n'a pas paru sensiblement différent. L'augmentation de l'adhérence sur la section témoin est plus probablement due au fait que les résultats des essais ont été affectés par les troubles et les dommages superficiels, liés à l'abrasion.

4.7.3 Ornièreur danois d'enrobés bitumineux

Dans l'installation d'essais de chaussée du TRL (voir 4.6.1), quatre grandes dalles (1 100 x 1 400 mm environ) ont été extraites d'une section de chaussée en bitume époxy qui n'avait été soumise à aucune charge. Les échantillons ont été transportés au Danemark pour des essais accélérés de déformation permanente dans l'ornièreur danois d'enrobés bitumineux. Cet équipement peut effectuer des chargements accélérés en vraie grandeur correspondant au quart d'un poids lourd (charge maximale par essieu de 130 kN, à 5 km/h), sous atmosphère contrôlée, avec une régulation indépendante de la température dans la partie supérieure et la partie inférieure de la structure à liaison bitumineuse, pour créer un gradient de température réaliste, à travers la chaussée. Un déplacement transversal stochastique de la machine d'orniérage est introduit lors des chargements pour simuler davantage la réalité.

La piste d'essai a été testée dans les conditions habituellement utilisées pour évaluer le risque d'orniérage de différentes chaussées sur les autoroutes danoises [21]. Ces conditions sont les suivantes : charge par essieu de 100 kN, pneu Super Single, 900 kPa, 5 km/h, déplacement transversal suivant stochastiquement une distribution normale avec écart type de 100 mm et gradient de température de haut en bas de 40° à 20° C. Deux dalles ont été testées selon ces paramètres, tandis que les deux autres ont été testées à un gradient de température élevé de 50° C dans la partie supérieure et de 30° C dans la partie inférieure.

Les dalles ont présenté, dans les deux situations d'essai, une déformation permanente similaire ou inférieure à celle préalablement observée sur les chaussées autoroutières danoises. La majeure partie de l'orniérage mesuré à la surface s'est produite dans les deux couches de base bitumineuses, par l'association d'une densification et d'un écoulement plastique du matériau de couche de base relativement souple. Pratiquement, aucun orniérage n'a pu être déterminé dans la couche de surface en bitume époxy. Aucun décollement ni aucune délamination entre la base et le bitume époxy n'ont été détectés.

4.8 Évaluation des caractéristiques de surface

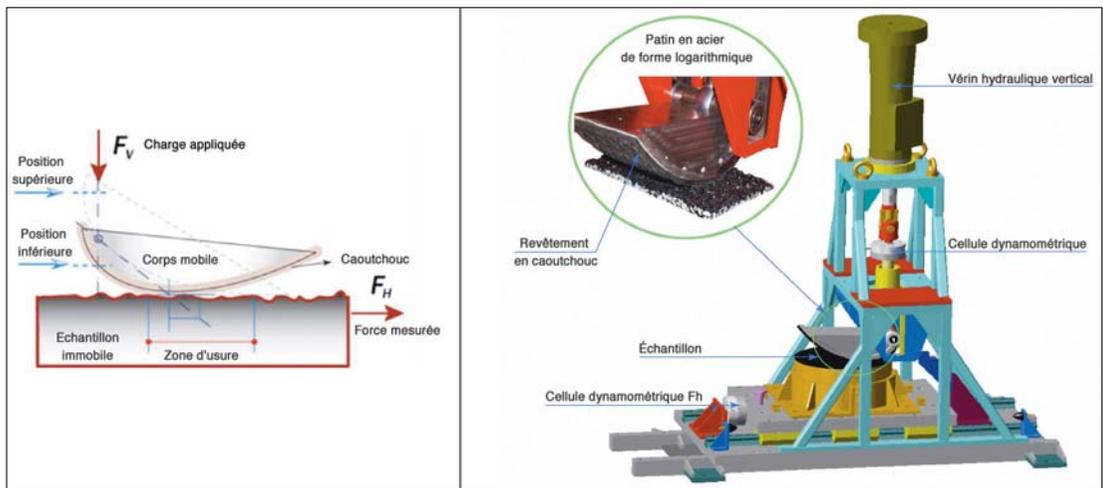
Les caractéristiques de surface des enrobés époxy ont été déterminées sur les dalles compactées en laboratoire et sur les sections de chaussée d'essais accélérés en vraie grandeur. Ces essais ont été limités à une évaluation des caractéristiques d'arrachement et des propriétés de frottement.

4.8.1 Résistance à l'effort de cisaillement et à l'arrachement

Un nouveau dispositif d'essai, appelé T2R, a été utilisé pour évaluer la résistance au cisaillement des enrobés bitumineux employés dans la construction routière en France. La procédure d'essai consiste à appliquer une charge cyclique en compression sur le patin de chargement. Étant donné l'effet logarithmique de la forme du patin de chargement, on sollicite l'éprouvette avec une force oblique.

L'angle de la force de charge par rapport à l'éprouvette reste constant pendant l'essai. Les mouvements cycliques du patin de chargement sur l'éprouvette détériorent progressivement la surface de l'éprouvette et provoque une perte de granulats. Habituellement, les tribomètres mesurent la résistance à l'usure sous un déplacement imposé. Ce nouveau dispositif, proposé par Stefani et al [19] maintient un niveau de charge constant, quel que soit l'état de dégradation de surface (voir figure 4.22). Ce résultat est obtenu en utilisant un patin de forme logarithmique, soumis à une charge verticale. Le dispositif maintient le même rapport entre les forces de chargement vertical et de cisaillement horizontal pendant l'essai (brevet n° FR 06 50 054) [19]. Sur la zone de contact, la force dépend de la profondeur de texture des revêtements bitumineux et des propriétés rhéologiques des matériaux en contact (caoutchouc, enrobé bitumineux).

Figure 4.22. Tribomètre T2R du LCPC pour évaluer la résistance à l'effort de cisaillement

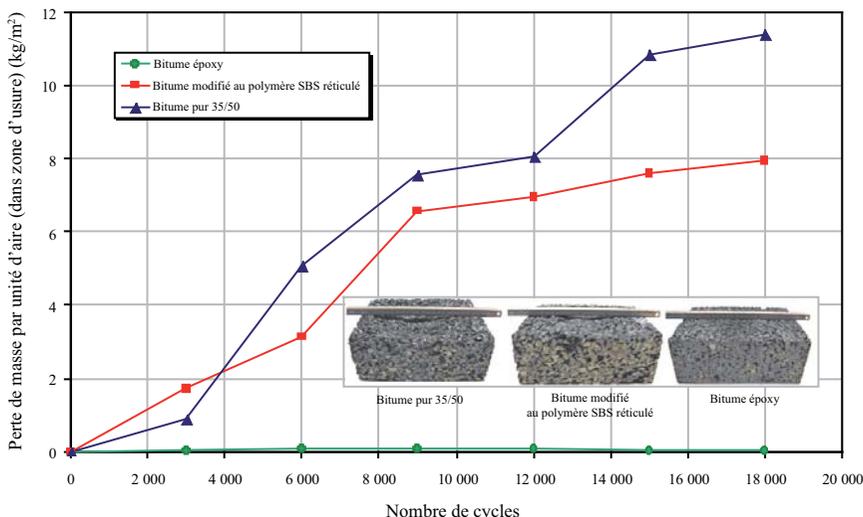


Source : F. Hammoum, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

Le T2R a été utilisé pour évaluer la résistance à l'effort de cisaillement d'enrobés du type BBTM élaborés avec trois différents liants : un liant classique de pénétrabilité 35-50, un liant modifié par des polymères SBS et un liant bitume époxy. Cette opération a été réalisée en mesurant l'usure, définie en tant que perte de matériau sur la zone de contact, en fonction du temps. Les résultats pour ces matériaux sont indiqués sur la Figure 4.23.

Le bitume époxy a présenté une usure minimale et des performances nettement meilleures que le bitume modifié au polymère et le bitume témoin. Ces résultats suggèrent que le bitume époxy pourrait avoir un bon comportement dans les couches en enrobé mince, sensibles à l'arrachement.

Figure 4.23. Évolution de la perte de masse selon le nombre de cycles à température ambiante, pour différents enrobés bitumineux



Source : F. Hammoum, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

4.8.2 Frottement

Outre les essais et les résultats présentés en 4.7.2, un appareil a été utilisé pour évaluer le frottement sur les sections de chaussée d'essais en bitume époxy et en matériau de contrôle (Masterpave), mises en œuvre au TRL. Le bitume époxy a présenté une adhérence de 75 et le Masterpave, de 65. Après une simulation de trafic, les deux valeurs ont augmenté : l'adhérence de la section en bitume époxy a atteint 79 et celle du Masterpave, 76. Cette augmentation est probablement due au décapage du film de bitume présent sur les granulats. La surface retrouve ainsi la microtexture des granulats qui se traduit par une adhérence.

4.8.3 Bruit

Aucun essai n'a été réalisé pour comparer les caractéristiques acoustiques des bitumes époxy et des bitumes traditionnels. On suppose que la formulation a un effet plus sensible sur le bruit que la nature du bitume.

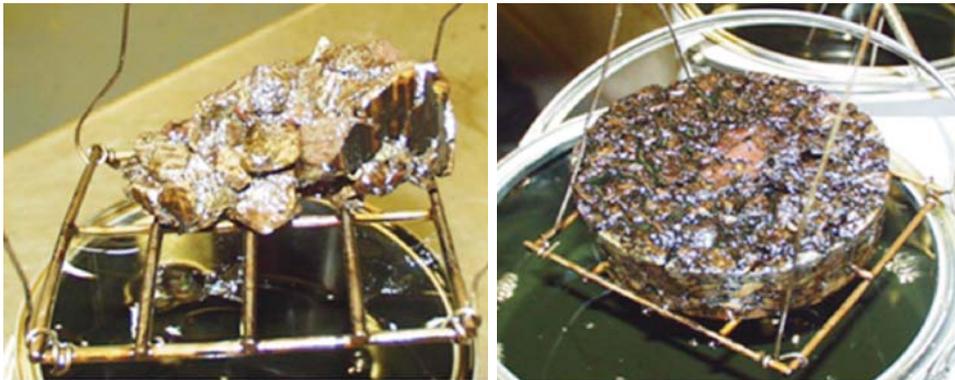
4.9 Essais divers

4.9.1 Résistance aux déversements de carburant

La résistance des revêtements de chaussée bitumineux à la dissolution due aux déversements de carburant a été évaluée à l'aide de l'essai d'immersion dans le diesel. La procédure consiste à placer l'éprouvette compactée dans un panier, puis de l'immerger totalement dans des récipients de 5 litres, remplis de diesel, à la température ambiante du laboratoire. Dans tous les cas, les éprouvettes sont maintenues environ 25 mm au-dessus du fond du récipient et sont totalement recouvertes de solvant. Après une immersion d'environ 10 minutes, la masse immergée initiale est mesurée en suspendant le

panier au-dessous d'une balance, tout en maintenant l'éprouvette complètement immergée. La procédure est répétée quotidiennement pendant la durée exigée. La Figure 4.24 montre une éprouvette pesée tandis qu'elle est suspendue dans le diesel. Il apparaît clairement que l'ensemble des enrobés HRA époxy n'ont pas été modifiés par l'exposition à l'hydrocarbure. Les enrobés HRA ont présenté des résultats similaires.

Figure 4.24. **Éprouvettes SMA immergées dans le diesel pendant 8 jours**



Éprouvette de contrôle

Éprouvette en bitume époxy

Source : Richard Elliott, Scott Wilson Pavement Engineering (Royaume Uni).

4.9.2 **Recyclabilité**

Les éprouvettes de bitume époxy fabriquées au moyen d'une presse à cisaillement giratoire ont été concassées à l'aide d'un broyeur à marteaux, puis passées plusieurs fois au tamis, pour obtenir une large distribution de tailles. Le matériau concassé a été vieilli pour simuler un stock de matériau bitumineux de récupération. Il a ensuite été malaxé avec le granulats de référence, afin que sa part dans le mélange et la composition granulométrique soit de 20 %. Notons que le granulats recyclés en bitume époxy est plus texturé que le granulats recyclés traditionnels. Cette propriété devrait permettre d'obtenir une structure plus imbriquée et, par conséquent, un module plus élevé. Cet enrobé de recyclage a présenté les mêmes performances que l'enrobé de recyclage traditionnel, en ce qui concerne la maniabilité et le niveau de volatilité apparent.

4.10 **Résumé et conclusions**

Au cours de ces travaux, un grand nombre de données ont été collectées par sept laboratoires. L'objectif a été d'étudier le comportement et les propriétés des matériaux identifiés comme candidats et de les tester suffisamment pour évaluer leur utilité en couches de roulement à longue durée de vie.

Avec l'emploi de matériaux locaux, différents types de bitume époxy ont été identifiés et longuement évalués en tant que liants et composants dans plusieurs systèmes d'enrobés. Les données ont été comparées à celles des bitumes traditionnels. Ces travaux ont permis non seulement d'avancer dans la compréhension et l'application éventuelle du bitume époxy, en tant que matériau de surface, mais aussi d'apporter des informations et une aide pour de nouveaux outils de caractérisation en cours de développement, servant à évaluer la fatigue et la propagation de fissures.

Des conseils de fabrication ont été remis par les différents fournisseurs de bitume époxy ; elles concernent les compositions des mélanges, les températures de malaxage, ainsi que les durées et les températures de polymérisation. Néanmoins, la familiarisation avec le mélange à deux phases, l'expérience acquise en matière de polymérisation et l'établissement des protocoles de conditionnement d'un bitume époxy donné étaient d'une importance capitale pour les essais et les évaluations du matériau. C'est pourquoi trois types d'essais ont été menés : un premier pour mesurer la vitesse de polymérisation, un deuxième pour déterminer les propriétés du système à l'état de polymérisation complète et un troisième pour évaluer l'effet d'une polymérisation incomplète sur les performances du bitume époxy.

Par commodité, les bitumes époxy évalués ont été classés en deux catégories : bitumes époxy (à base d'amine) à prise modérée et à prise rapide et bitumes époxy (à base d'acide) à prise lente. Les bitumes époxy à base d'amine à prise modérée ont posé quelques problèmes, car les systèmes ont pris trop vite pour assurer un compactage adéquat ; ce phénomène a entraîné une augmentation de la teneur en vides des éprouvettes compactées. Les bitumes époxy à durcissement rapide ne semblent donc pas compatibles avec une utilisation dans une centrale d'enrobage traditionnelle. Ces matériaux pourraient avoir de bonnes performances avec un enrobage à froid, bien que des données seraient nécessaires pour le déterminer. Quelle que soit la vitesse de polymérisation, l'emploi des bitumes époxy doit faire l'objet d'un soin particulier, pour garantir une polymérisation appropriée avant l'ouverture à la circulation.

Les propriétés de liaison des bitumes époxy évalués ont été nettement supérieures à celles du bitume traditionnel. Les bitumes époxy réticulés sont plus rigides, ont une force de cohésion sensiblement plus élevée, offrent une meilleure résistance à l'effort de cisaillement et sont moins sensibles à l'oxydation.

Les enrobés époxy apportent des améliorations significatives en termes de résistance à l'orniérage, de résistance à l'humidité et de durée de vie en fatigue, lorsqu'ils sont soumis à de faibles déformations, mais pas aussi marquées et dépendantes de la formulation, lorsqu'ils sont soumis à une déformation élevée. Ce résultat suggère que l'utilisation du bitume époxy pourrait être limitée aux revêtements posés sur des couches de fondation très rigides, ce qui a été confirmé par les essais de chaussée accélérés du TRL (comme indiqué plus loin). Un deuxième sujet de préoccupation est la perte de ductilité à basses températures, car elle s'est avérée plus importante pour les enrobés (et les liants) de bitume époxy. Pour déterminer si cette perte pourrait entraîner une utilisation limitée du bitume époxy, de nouvelles méthodes d'évaluation de l'amorçage et de la propagation de fissures ont été adoptées. Elles ont toutes indiqué que le bitume époxy était un matériau plus dur, qui offrait une résistance sensiblement plus élevée à ces deux aspects de la fissuration.

L'essai de fragilisation simulant la résistance d'un enrobé BBDR à l'arrachement sur le terrain a donné des résultats reflétant les propriétés rhéologiques du liant. Le bitume époxy se polymérise, mais ne vieillit pas sensiblement. Soumis à une simulation de vieillissement (de 7 ans), il a présenté des résultats sensiblement meilleurs que le matériau témoin. Une série limitée d'essais de chaussée accélérés à l'aide de CAPTIF a montré des signes précoces d'abrasion de surface sur la section témoin, mais pas sur la section en époxy.

Un essai composite empirique a été mené pour évaluer le bitume époxy sur couches de base souples et rigides. Les performances des éprouvettes en époxy ont été bien supérieures à celles de l'éprouvette de contrôle, en termes de déformation de fluage cumulée, de propagation des fissures et d'endommagement général. Les essais comparatifs de résistance de l'interface n'ont pas donné de résultats concluants, dès lors que la couche de liaison a été le facteur de contrôle ou que la rupture s'est produite dans la couche inférieure.

Les résultats des essais en laboratoire sur les liants et les enrobés ont été validés par les trois séries de tests réalisées dans l'installation d'essais de chaussée. Les sections en bitume époxy ont affiché des performances supérieures à la section témoin. L'un des enseignements tirés est que le revêtement de bitume époxy doit être placé sur une couche de base suffisamment rigide pour éviter l'orniérage de la couche sous-jacente. Même si le revêtement résiste à la déformation, la section inférieure peut subir des déformations excessives qui se transmettent et provoquent des fissurations longitudinales ou un déchirement de la couche de surface. Ces résultats sont un peu limités, dans la mesure où ils reflètent les performances d'un seul bitume époxy. Des performances élevées devraient néanmoins être obtenues avec d'autres systèmes époxy.

Les caractéristiques systémiques telles que l'adhérence et le polissage sont déterminées en grande partie par les propriétés du granulat et la formulation. Les sections témoins et époxy soumises aux essais de chaussée accélérés ont présenté des valeurs d'adhérence similaires au moment de leur mise en œuvre. Après application d'une charge, les valeurs de la section témoin ont eu tendance à s'améliorer, à mesure que la surface subissait des dommages dus à l'abrasion, tandis que celles du bitume époxy demeuraient minimales.

Dans un essai conçu pour simuler le déversement de carburant, les enrobés époxy se sont avérés extrêmement résistants à l'immersion dans le diesel et ont subi une perte de masse négligeable. Par comparaison, les enrobés HRA témoins ont rompu dans un délai d'immersion de 4 jours.

En résumé, les nombreux essais réalisés sur les bitumes époxy ont été prévus pour couvrir toutes les questions importantes concernant les propriétés connues pour être déterminantes en matière de durabilité et de longévité d'une chaussée à fort trafic. Tous montrent que le bitume époxy devrait allonger sensiblement la durée de service des chaussées par rapport aux liants traditionnels.

RÉFÉRENCES

1. Al-Khateeb G. et Shenoy A. (2004), *A Distinctive Fatigue Failure Criterion*, Journal, Association of Asphalt Paving Technologists, n° 73, 585-622, États-Unis.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials (avril 2001), *Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength*, AASHTO Provisional Standards, TP10-93, Interim Edition, États-Unis.
3. Andrei D., Witzak M.W. et Mirza M.W. (mars 1999), *Development of a Revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures*, National Cooperative Highway Research Program 1-37A Inter Team Report, University of Maryland, États-Unis.
4. Austroads Pavement Reference Group (1999), *Selection and design of asphalt mixes: Australian provisional guide*, APRG Report n° 18, APRE, Austroads, Sydney, Australie.
5. Balala B. (1969), *Studies Leading to Choice of Epoxy Asphalt for Pavement on Steel Orthotropic Bridge Deck of San Mateo-Hayward Bridge*, Highway Research Record n° 287, 12-18, États-Unis.

6. Bonaquist, RF (2003), *Simple Performance Tester for Superpave Mix Design*, Quarterly Progress Report (Appendix B), National Cooperative Highway Research Program Project n° 9-29, États-Unis.
7. Chehab G.R., Kim Y.R., Schapery R.A., Witczak M.W. et Bonaquist R. (2003), *Characterization of Asphalt Concrete in Uniaxial Tension using a Viscoelastoplastic Continuum Damage Model*, Journal, Association of Asphalt Paving Technologists, n° 72, 315-355, États-Unis.
8. Gaul R.W. (1993), *Epoxy Asphalt Concrete – A Polymer Concrete with 25 Years Experience*, American Society for Testing and Materials, Special Publication n° 166-13, 233-251 in *Properties and Uses of Polymers in Concrete*, révisé par Fontana J.J., Kaeding Al O., Krauss Paul D. (1996), American Concrete Institute, n° 13, 233-251, États-Unis.
9. Herrington P., Reilly S. et Cook S. (2005), *Porous Asphalt Durability Test*, Transfund New Zealand Research Report n° 265, 32 pp., Nouvelle-Zélande.
10. Kim Y., Lee H.J., Little D.N. et Kim Y.R. (2006), *A Simple Testing Method to Evaluate Fatigue Fracture and Damage Performance of Asphalt Mixtures*, Journal, Association of Asphalt Paving Technologists, n° 75, États-Unis.
11. Li X. et Marasteanu M.O. (2004), *Cohesive Modeling of Fracture in Asphalt Mixtures at Low Temperatures*, soumis à la revue International Journal of Fracture, États-Unis.
12. Li X., Marasteanu M.O., Iverson N. et Lubuz J.F. (2006), *Observation of Crack Propagation in Asphalt Mixtures Using Acoustic Emission*, présenté au 85th Annual Transportation Research Board Meeting (Compendium of Papers CD), Washington, États-Unis.
13. Organisation de Coopération et le Développement Économiques (2005), *Évaluation économique des chaussées à longue durée de vie : Phase 1*, OCDE, Paris, France.
14. Pine Instrument Company (2003), *Rotary Asphalt Wheel Tester Operation Manual*. LMAFW1A (Rev 002), États-Unis.
15. Qi X., Al-Khateeb G., Mitchell T. et Stuart K. (novembre 2003), *Construction of Accelerated Loading Facility (ALF) Pooled Fund Study Pavements*, TPF 5(019), Final Report, Turner-Fairbank Highway Research Center (TFHRC), États-Unis.
16. Qi X., Shenoy A., Al-Khateeb G., Arnold T., Gibson N., Youtcheff J. et Harman T. (2006), *Laboratory Characterization and Full-Scale Accelerated Performance Testing Crumb Rubber Asphalts and Other Modified Asphalt Systems*, Journal of Road Materials and Pavements Design, États-Unis.
17. Qi X., Shenoy A., Al-Khateeb G., Arnold T., Gibson N., Youtcheff J. et Harman T. (octobre 2006), *Laboratory characterization and full-scale accelerated performance testing of crumb rubber asphalts and other modified asphalt systems*, Proceedings of the Asphalt Rubber 2006 Conference, p. 39-65, Palm Springs, États-Unis.
18. Roque R., Bjorn B. et Christos D. (2004), *Development and Field Evaluation of Energy-Based Criteria for Top-Down Cracking Performance of Hot-Mix Asphalt*, Journal, Association of Asphalt Paving Technologists, n° 73, 229-260, États-Unis.

19. Stéfani C., Hammoum F., Merliot E. et Cottineau L.M. (6 janvier 2006), *Dispositif et procédé permettant la mesure de phénomènes tribologiques*, brevet n° FR 06 50 054, 15 pp., France.
20. Stuart K.D., Youtcheff J.S. et Mogawer W.S. (2002), *Understanding the Performance of Modified Asphalt Binders in Mixtures: Evaluation of Moisture Sensitivity*, Final Report, FHWA-RD-02-029, Federal Highway Administration (FHWA), McLean, Virginie, États-Unis.
21. Wagoner M.P., Buttlar W.G. et Paulino G.H. (juin 2005), *Disk-Shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture*, Society for Experimental Mechanics, n° 45 (3), 270-277, États-Unis.
22. Wagoner M.P., Buttlar W.G., Paulino G.H. et Blankenship P. (2006), *Laboratory Testing Suite for Characterization of Asphalt Concrete Mixtures Obtained from Field Cores*, Journal, Association of Asphalt Paving Technologists, n° 75, États-Unis.

5. ENDUIT HYDRAULIQUE FIBRÉ GRAVILLONNÉ : RÉALISATION ET RÉSULTATS DES ESSAIS

5.1 Introduction : un matériau hydraulique innovant pour couches de roulement

Pendant les travaux de phase II, deux familles techniques de matériaux candidats pour couches de roulement à longue durée ont été testées et évaluées. La première figure parmi les bitumes et la deuxième, parmi les bétons. Ce chapitre porte sur le développement, les essais et l'évaluation d'un Enduit hydraulique fibré gravillonné (EHFG).

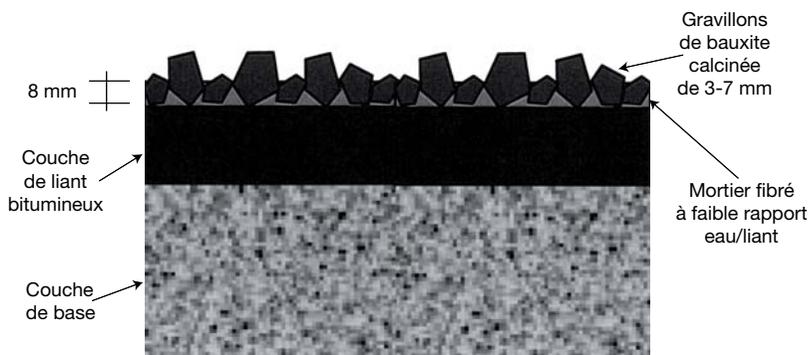
Le revêtement de béton innovant actuellement à l'étude est constitué d'une mince couche de 8 mm de mortier fin fibré, à ultra-hautes performances, dans laquelle sont enchâssées des particules dures de granulat, résistant au polissage. Le développement de l'EHFG a compris différentes étapes et délibérations : sélection des constituants, formulation, procédures d'application en laboratoire et évaluation du comportement par différents essais incluant une série de procédures de dégradation, telles que l'abrasion, la fatigue, la fissuration par retrait empêché, le cycle de gel-dégel, etc.

L'une des principales conditions exigées pour une couche de roulement est l'adhérence, qui dépend des granulats enchâssés dans le revêtement. Pour une couche de surface à longue durée de vie, il est essentiel de choisir un granulat offrant une résistance élevée au polissage. L'expérience montre que la bauxite calcinée est un des meilleurs granulats disponibles ; mais c'est aussi un matériau cher, distribué par un nombre limité de fournisseurs : son coût unitaire est 30 à 40 fois plus élevé que celui des granulats ordinaires. En conséquence, s'il faut l'utiliser, il conviendrait que l'enduit soit composé d'une seule couche de particules de granulat. Parmi les tailles de granulat disponibles, la taille choisie est de 3-7 mm. En effet, une taille maximale de granulat d'environ 6 mm semble optimale lorsque l'association d'une adhérence appropriée et d'une émission acoustique limitée est nécessaire.

Vient ensuite la conception du liant dont la fonction essentielle est d'assurer l'adhésion des gravillons de bauxite calcinée avec la chaussée. Lorsqu'on décide d'utiliser un liant hydraulique, il est important d'élaborer un matériau fin, offrant la résistance à la traction la plus élevée qu'on puisse obtenir sur le terrain. D'après l'expérience acquise sur les bétons à ultra-hautes performances¹, il faut concevoir un mélange de sable, ciment Portland, fumée de silice, superplastifiant et eau, avec un faible rapport eau/liant. Comme pour le béton de ciment mince collé², une liaison de bonne qualité est essentielle entre le mortier de ciment et le support bitumineux. Toutefois, en raison du retrait du mortier, qui sera empêché par la structure de la chaussée, une fissuration risque de se produire. Pour limiter l'ouverture de fissures, un renforcement est nécessaire. Étant donné la minceur de la couche de mortier, seul l'ajout de fibres au mélange peut jouer ce rôle. L'épaisseur de cette couche de mortier fibré doit être minimale, pour des raisons de coût, mais elle doit être suffisante pour éviter que les gravillons n'entrent en contact direct avec la couche de base bitumineuse, afin de permettre une bonne pénétration des gravillons dans le mortier frais. En outre, le composite gravillons-mortier doit former une couche de surface solide pour protéger les couches de chaussée inférieures. Compte tenu de toutes ces exigences, l'épaisseur de mortier a été fixée à 8 mm. La Figure 5.1 résume le schéma adopté pour l'EHFG³.

Ce chapitre présente les différents essais réalisés pour développer et caractériser ce revêtement d'EHFG innovant. Les sections 5.2 à 5.5 traitent du choix des constituants, de la formulation et des mesures du retrait du mortier brut. La section 5.6 décrit les procédures de mise en œuvre de l'EHFG utilisées dans les essais en laboratoire et à l'extérieur. Les sections 5.7 à 5.9 portent sur le comportement en fissuration du composite EHFG, à différentes échelles. Les sections 5.10 à 5.14 évaluent les probabilités de perte de gravillons sous l'action du trafic et/ou l'effet du climat. Les sections 5.15 et 5.16 portent sur le comportement en fatigue de l'EHFG aux niveaux du matériau et de la structure. La section 5.17 donne les prédictions relatives aux émissions acoustiques à l'interface pneu-couche de roulement. La section 5.18 étudie le risque de délamination et de flambement. Enfin, la section 5.19 dresse les premières conclusions de cette série d'essais.

Figure 5.1. Principe de la solution EHFG



Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

5.2 Choix des constituants [Rapport EHFG 1, 2]

Au début de l'étude, afin d'obtenir une série de données cohérente, les membres du groupe Enduit hydraulique fibré gravillonné ont décidé d'utiliser les constituants et les mélanges employés au cours des essais réalisés dans les laboratoires nationaux des sept pays participants. Les constituants entrant dans la formulation des mélanges initiaux sont les suivants :

- Bauxite calcinée, de 3-7 mm probablement.
- Sable éolien siliceux fin.
- Ciment Portland CEM I.
- Fumée de silice grise.
- Superplastifiant de type polycarboxylate sous forme de poudre.
- Retardateur disponible sur le marché sous forme liquide, pour limiter le phénomène de perte d'affaissement.
- Fibres d'acier d'une longueur de 13 mm et d'un diamètre de 0.2 mm ou fibres de PVA (alcool polyvinylique) d'une longueur de 15 mm et d'un diamètre de 0.33 mm.

Après le développement d'une formulation de base pour le mortier (voir section suivante), un prémélange intégrant tous les constituants secs (y compris le superplastifiant) a été préparé par le fournisseur commercial (SIKA France) et livré sur commande aux laboratoires nationaux des membres du groupe Enduit hydraulique fibré gravillonné, dans leurs pays respectifs.

5.3 Formulation, fabrication et caractérisation du mortier (LCPC, France) [Rapport EHFG 3, 12]

La formulation initiale du mortier a été développée en tenant compte des éléments suivants :

- *Consistance très plastique*

Le mortier doit être facile à mettre en oeuvre, mais ne doit pas avoir tendance à se niveler, car la surface des chaussées présente toujours une certaine inclinaison (entre 1-2 % et 6 % ou plus). Une valeur d'affaissement d'environ 10-11 cm a été initialement choisie. Après une deuxième série d'essais de fissuration, il a été décidé qu'une valeur d'affaissement plus élevée (environ 20 cm) améliorerait l'adhésion du mortier avec la couche de liant.

- *Importance du dosage en superplastifiant*

Ce type d'additif est essentiel dans tout béton à hautes performances, notamment lorsque le rapport eau/liant est très faible. Le dosage de saturation est un bon point de départ, si le point suivant est bien assuré.

- *Absence de croûte en surface*

Dans le cas de nombreux BHP, il se constitue une fine croûte de matériau en surface peu après la finition, même lorsque la cure a été réalisée avec soin. Cette croûte doit être évitée, car les gravillons doivent être enchâssés par une bonne adhésion avec la couche de mortier.

- *Utilisation possible de gravillons 3-7*

Il est important que le gros granulat puisse pénétrer dans la surface du mortier. Cela signifie que ce dernier ne doit pas être trop dense, mais doit pouvoir, dans une certaine limite, couler entre les particules de gros granulat. En d'autres termes, la formulation initiale a été étudiée en partant de l'hypothèse que le mélange de mortier avec la moitié des gravillons pourrait être mis en œuvre selon un degré de compactage normal.

- *Rapport eau/ciment = 0.20*

Le rapport eau/ciment de 0.20 est typique de la plupart des bétons à ultra-hautes performances (BUHP) produits sur le marché. Il garantit que le matériau figurera parmi les bétons les plus performants. L'adoption d'une valeur inférieure aurait créé des difficultés dans la rhéologie du mélange frais, c'est-à-dire un matériau difficile à mettre en œuvre à l'échelle industrielle.

- *Rapport fumée de silice / ciment = 0.20*

Cette valeur est également typique d'un béton à ultra-hautes performances. Une valeur supérieure entraînerait un coût plus élevé pour, au mieux, une légère amélioration du matériau.

Après quelques gâchées d'essai, la recette indiquée dans le Tableau 5.1 a été obtenue et appelée mortier A (sans fibres). Ces mélanges exigent une durée de malaxage importante et une séquence

soigneusement optimisée, comprenant le mouillage du malaxeur, l'introduction des matériaux secs, la première phase de malaxage, l'ajout de l'eau contenant les additifs, la deuxième phase de malaxage, l'ajout des fibres, la troisième phase de malaxage et le déchargement du malaxeur. La durée totale de malaxage varie entre 5 et 15 minutes, selon le type et le volume du malaxeur. Les principales propriétés du mortier A et du mortier A mélangé avec 1 % de fibres d'acier sont indiquées dans le Tableau 5.2 (les éprouvettes ont été curées à 20° C et à 100 % d'humidité relative (H.R.) après démoulage).

Tableau 5.1. Composition du mortier A (sans fibres)

Constituants	Kg/m ³
Sable siliceux grossier 0.2-1	432
Sable siliceux fin 0.08-0.315	432
Ciment Portland CEM I	991
Fumée de silice	198
Superplastifiant (poudre sèche)	2.93
Eau	198
Eau/ciment (e/c ⁴)	0.20

Tableau 5.2. Propriétés du mortier A et du mortier A avec 1 % de fibres d'acier

Propriétés du mélange humide et durci	Mortier A	Mortier A + 1 % de fibres d'acier
Affaissement [cm]	11.5	14
Teneur en vides, mesurée avec un aéromètre à mortier [%]	6.3	5.8
Résistance à la compression à 28 jours, mesurée sur éprouvettes de 4 x 4 x 16 cm [MPa]	138	172
Résistance à la flexion à 28 jours, mesurée sur éprouvettes de 4 x 4 x 16 cm [MPa]	24.9	23.5
Module d'élasticité à 28 jours, mesuré sur éprouvettes de 11 x 22 cm [GPa]	-	42.5

Pendant la série préliminaire d'essais de fissuration (voir section 5.6), il a été constaté que le mélange était sujet à des pertes d'affaissement précoces. Un retardateur a donc été ajouté et la formulation suivante de mortier B a été obtenue (voir tableau 5.3).

Tableau 5.3. Composition du mortier B brut

Constituants	Kg/m ³
Sable siliceux grossier 0.2-1	429
Sable siliceux fin 0.08-0.315	429
Ciment Portland CEM I	985
Fumée de silice	197
Superplastifiant (poudre sèche)	2.91
Ralentisseur	4.95
Eau	195
Eau/ciment (e/c)	0.2
Affaissement après malaxage [cm]	9.5
Affaissement au bout d'une heure [cm]	9

Ultérieurement, il s'est avéré que la consistance du mélange devait être plus fluide, avec des pertes d'affaissement plus faibles. Une autre formulation de mortier a donc été recommandée (mortier C), avec plus de superplastifiant et d'eau. La composition de ce troisième mortier est indiquée dans le Tableau 5.4. De même, après les premiers résultats des essais de fissuration sur planches, une sélection provisoire a été réalisée pour aboutir à une solution comprenant 4 % de fibres de PVA. Le Tableau 5.5 présente les principales propriétés de ce mortier fibré. Cette dernière formulation a été utilisée dans la plupart des essais de performances sur EHFG de l'étude, avec un ajustement local du rapport eau-ciment, qui a varié entre 0.21 pour le mélange initial à 0.27 pour le mélange testé dans l'essai PTF (voir section 5.16).

Tableau 5.4. Composition du mortier C brut

Constituants	Kg/m ³
Sable siliceux grossier 0.2-1	429
Sable siliceux fin 0.08-0.315	429
Ciment Portland CEM I	985
Fumée de silice	197
Superplastifiant (poudre sèche)	4.4
Retardateur	4.95
Eau	207
Eau/ciment (e/c)	0.21
Affaissement [cm]	21

Tableau 5.5. **Propriétés du mortier C durci comprenant 4 % de fibres PVA**
(Propriétés à l'état frais : affaissement de 23 cm, teneur en vides de 4.5 %)

Dimensions des éprouvettes [cm]	Régime de cure	Type d'essai	Valeur moyenne [MPa]
Prismes 4 x 4 x 16	28 jours à 20° C, 100 % H.R.	Flexion	28.5
Prismes 4 x 4 x 16	28 jours à 20° C, 100 % H.R.	Compression	164
Prismes 4 x 4 x 16	56 jours à 20° C, 100 % H.R.	Flexion	35.7
Prismes 4 x 4 x 16	56 jours à 20° C, 100 % H.R.	Compression	182
Prismes 4 x 4 x 16	28 jours à 20° C + 28 jours à 60° C, 100 % H.R.	Flexion	31.5
Prismes 4 x 4 x 16	28 jours à 20° C + 28 jours à 60° C, 100 % H.R.	Compression	190
Cubes 10 x 10 x 10	28 jours à 20° C, 100 % H.R.	Compression	148
Cylindres Ø 11 x 22	28 jours à 20° C, 100 % H.R.	Module d'élasticité	43 000
Cylindres Ø 11 x 22	28 jours à 20° C, 100 % H.R.	Compression	129

Une analyse de sensibilité à l'eau a été réalisée par Dansk Beton Teknik (DBT), car le rapport eau/ciment avait augmenté au cours de certains travaux. Les résultats de cette étude en laboratoire figurent dans le Tableau 5.6.

Tableau 5.6. **Effet du dosage en eau sur la résistance à la compression et à la flexion du mortier C avec 2.5 % de fibres d'acier**
(mesures sur prismes de 4 x 4 x 16 cm selon EN 1097-1)

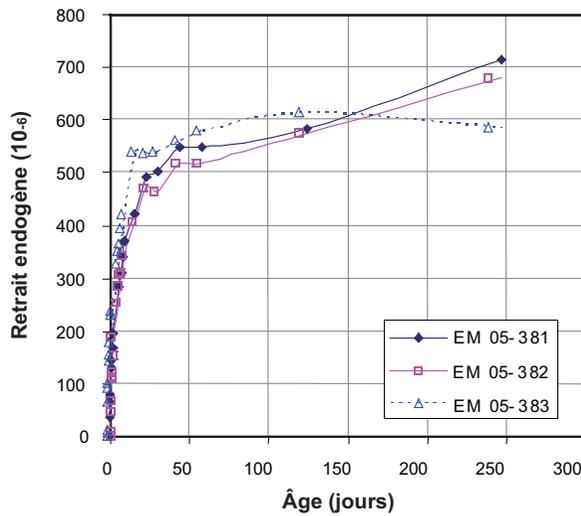
e/c	Résistance à la compression à 28 jours [MPa]	Résistance à la flexion à 28 jours [MPa]
0.21	188	41
0.23	171	35
0.25	132	29

5.4 Essais de retrait (LCPC, France) [Rapport EHFG 6]

Une certaine tendance à la fissuration a été prévue. C'est pourquoi des mesures du retrait ont été effectuées au début des travaux de phase II. Les essais de retrait ont été réalisés sur des prismes de mortier A sans fibres (7 x 7 x 28 cm). Six échantillons ont été coulés et scellés, puis démoulés au bout de 24 heures. Trois échantillons ont été curés à $20 \pm 2^\circ \text{C}$, $50 \pm 10\%$ H.R., pour la mesure du retrait total. Les trois autres échantillons ont été scellés avec une feuille adhésive en aluminium, pour la mesure du retrait endogène. Les échantillons ont été pesés afin de surveiller la perte en eau.

La phase de mortier d'EHFG a présenté un retrait endogène relativement important, comme le montre la Figure 5.2, résultat normal pour un matériau au rapport eau/ciment très faible. La valeur finale a été d'environ 600-700 $\mu\text{m/m}$. La perte en eau obtenue (environ 2 g ou 0.8 % de la teneur initiale en eau) a démontré la qualité de l'étanchéité à la vapeur obtenue grâce à la feuille en aluminium.

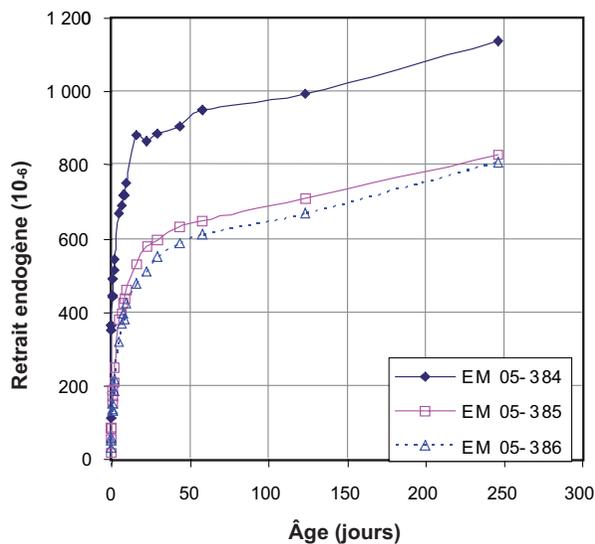
Figure 5.2. Retrait endogène du mortier EHFG en fonction du temps après démoulage



Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

Comme pour le retrait total, deux échantillons ont donné des résultats cohérents l'un avec l'autre, tandis que le troisième a présenté une valeur beaucoup plus élevée (voir Figure 5.3). Cependant, il est possible que la toute première mesure de longueur pour EM 05-384 ait été erronée. On peut donc supposer qu'un retrait total d'environ $800 \mu\text{m}/\text{m}$ est atteint au bout de 8 mois. La perte en eau au même âge est de 17 g par échantillon. Cette valeur est beaucoup plus élevée que pour l'échantillon scellé, mais reste faible par rapport à la teneur totale en eau. Le matériau au rapport eau/ciment très faible retient donc une petite quantité d'eau libre ; en outre, le processus de séchage est lent, en raison de la très faible porosité du matériau durci.

Figure 5.3. Retrait total du mortier EHFG en fonction du temps après démoulage



Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

En définitive, le retrait du mortier d'EHFG est essentiellement endogène et se produit pour l'essentiel dans les deux premiers mois. Il convient de remarquer qu'une partie du retrait a lieu dans un délai de 24 heures après le point de prise, c'est-à-dire avant le démoulage et n'a donc pas été mesurée.

5.5 Détermination du coefficient de dilatation thermique (FHWA, États-Unis)

Le *coefficient de dilatation thermique* est défini comme « le changement de longueur unitaire par degré de changement de température ». Il dépend de la composition, de l'âge et de l'humidité du béton.

Le coefficient de dilatation thermique de chaque constituant du béton peut varier sensiblement. Les différences minéralogiques entre les granulats se traduisent par la diversité des coefficients de dilatation thermique. La pâte de ciment peut avoir un coefficient de dilatation thermique plusieurs fois plus élevé que le granulat.

Le coefficient de dilatation thermique est une propriété très importante dans le dimensionnement d'une chaussée en béton, car il peut influencer sur les contraintes et déplacements liés au tuilage, ainsi que les contraintes et les mouvements axiaux. Il a donc un impact sur les performances et la qualité de service de la structure de la chaussée. Il peut avoir des conséquences sur la fissuration au jeune âge, la fissuration par fatigue, le décalage et l'épaufrure des joints³.

Une méthode d'essai provisoire permettant de déterminer le coefficient de dilatation thermique du béton (AASHTO TP60) a été développée au centre Turner Fairbank de la FHWA, dans le cadre du protocole d'essai des chaussées à performances de longue durée. Lors de cet essai, une carotte ou un cylindre en béton à l'état saturé sont soumis à des cycles de température (segments) de 10° C à 50° C et de 50° C à 10° C. Le changement de longueur est mesuré pour chaque segment (voir Figure 5.4). Le coefficient de dilatation thermique enregistré correspond à la moyenne des mesures des deux segments, corrigée pour tout changement de longueur de l'appareil de mesure (dès lors que le changement de longueur de l'un se situe dans la marge de tolérance de l'autre).

L'influence du degré d'humidité sur le coefficient de dilatation thermique peut être importante. Ainsi, le coefficient de dilatation thermique du béton à l'état sec et à l'état saturé est plus faible qu'à l'état partiellement saturé. La valeur à 100 % d'humidité relative (H.R.) est 20 % à 25 % inférieure à la valeur maximale, observée à 60 % ou 70 % d'humidité relative.

Pour éliminer l'effet de la variation liée à l'humidité, l'essai est réalisé dans un bain d'eau et les éprouvettes sont maintenues à l'état saturé. Celui-ci est considéré comme atteint lorsque deux pesées successives de l'éprouvette, surface sèche, à intervalles de 24 heures, montrent une augmentation du poids inférieure à 0.5 %.

La saturation de l'EHFG peut être difficile à obtenir en raison d'une faible perméabilité. Les essais de coefficient de dilatation thermique réalisés sur l'EHFG dans les conditions spécifiées (c'est-à-dire lorsque deux pesées successives de l'éprouvette, surface sèche, à intervalles de 24 heures, montrent une augmentation du poids inférieure à 0.5 %) ne signifient donc pas nécessairement que l'éprouvette ait été saturée.

Le Tableau 5.7 montre le coefficient de dilatation thermique des trois mélanges EHFG préparés comme indiqué à la section 5.3 (formulation C avec 4 % de fibres de PVA). Les résultats sont très cohérents. La moyenne des trois mélanges a été de $17.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, c'est-à-dire nettement plus élevée que la moyenne obtenue au centre Turner pour les BUHP disponibles sur le marché (Ductal).

Tableau 5.7. Coefficient de dilatation thermique

Numéro du mélange	Coefficient de dilatation thermique ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
6061	17.2
6062	17.1
6063	17.2

Une spectrométrie de fluorescence X à dispersion d'énergie des éléments du mélange a montré une différence significative dans les pics de Si et de Ca des deux matériaux, qui pourrait expliquer le coefficient de dilatation thermique plus élevé de l'EHFG (voir Tableau 5.8).

Tableau 5.8. Spectrométrie de fluorescence X à dispersion d'énergie de l'EHFG et de Ductal

Élément	Poids en %	
	EHFG	Ductal
Al	11.74	1.44
Ca	25.63	15.05
Fe	-	1.03
Mg	-	0.79
O	46.68	49.44
S	1.39	1.04
Si	24.58	31.24

Figure 5.4. Cadre de détermination du coefficient de dilatation thermique et dilatomètre à LVDT
Le cadre et les LVDT sont placés dans un réservoir à eau.



Source : Turner-Fairbank Highway Research Center / Federal Highway Administration (États-Unis).

Le coefficient de dilatation thermique est plus que jamais une propriété à prendre en compte, notamment lorsque le matériau doit être utilisé en couche de surface. Le coefficient de dilatation thermique du béton ordinaire varie habituellement entre $6 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$ et $12 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$, une valeur bien inférieure à celle de l'EHFG.

Cependant, les essais de fissuration sur planches à l'extérieur, mentionnés à la section 5.7, montrent que la fissuration tend à être plus prononcée à température élevée. Cela signifie que l'EHFG a un coefficient de dilatation thermique moins élevé que le matériau bitumineux voisin. Un coefficient de dilatation thermique élevé de l'EHFG pourrait donc être un facteur modérateur, en ce qui concerne la fissuration du matériau.

5.6. Procédures de préparation du bitume et de mise en œuvre de l'Enduit hydraulique fibré gravillonné [Rapport EHFG 4, 12]

Après la deuxième série d'essais de fissuration (indiquée en 5.4), il a été conclu que la couche de bitume exigeait une préparation particulière :

- La macrotecture doit être suffisamment élevée pour assurer l'adhésion du mortier avec les particules de granulat superficielles du béton bitumineux. Un grenailage a été suggéré et réalisé lors d'un certain nombre d'essais. La macrotecture nécessaire, déterminée par la mesure au sable vraie (selon EN 13036-1), a été de 2.5 mm. Les valeurs obtenues dans les différents essais ont varié entre 1.0 et 2.5 mm.
- La surface doit être humide et propre, sans aucune poussière ni poche d'eau.
- Pour les essais semi-industriels, des tranchées de 10 x 10 mm ont dû être sciées sur le bord des pistes d'essai, pour éviter un glissement de l'extrémité de l'EHFG, induit par le retrait.

La Figure 5.5 montre l'aspect typique d'une couche de bitume bien préparée avant la mise en œuvre de l'EHFG.

L'étape suivante de la procédure a consisté à mettre en œuvre l'enduit hydraulique fibré gravillonné sur la surface de bitume. Une baguette en bois de 8 mm de hauteur a servi de coffrage, sur lequel une planche droite, en l'occurrence une règle, a été appliquée pour répandre le mortier frais, comme illustré sur la Figure 5.6a.

Pour insérer les gravillons, une première méthode (procédure A) a consisté à épandre un lit dense de gravillons sur le mortier frais. Cette couche a ensuite été compactée à l'aide d'un cylindre en bois, après mise en place d'une règle en bois de 10 mm de hauteur (voir Figure 5.6b). Les gravillons rejetés ont ensuite été enlevés. La quantité de gravillons généralement enchâssés par cette procédure a été d'environ 6 kg/m^2 . Toutefois, il s'est avéré pendant les premiers essais sur planches que de nombreuses particules étaient mal fixées au mortier. La procédure a été adaptée en conséquence.

La deuxième méthode (procédure B) a consisté à placer une feuille adhésive en aluminium sur les particules, afin de coller la plupart de ces dernières. La feuille, avec les particules, a ensuite été appliquée à la surface du mortier frais et compactée comme dans la procédure précédente. La feuille a été maintenue sur les éprouvettes pendant 48 heures (pour servir de membrane de cure), puis enlevée.

Ultérieurement, il s'est avéré que la pose des particules était effectuée « en aveugle », entraînant parfois un mauvais enchâssement des particules. Il a semblé également que la surface de mortier pouvait

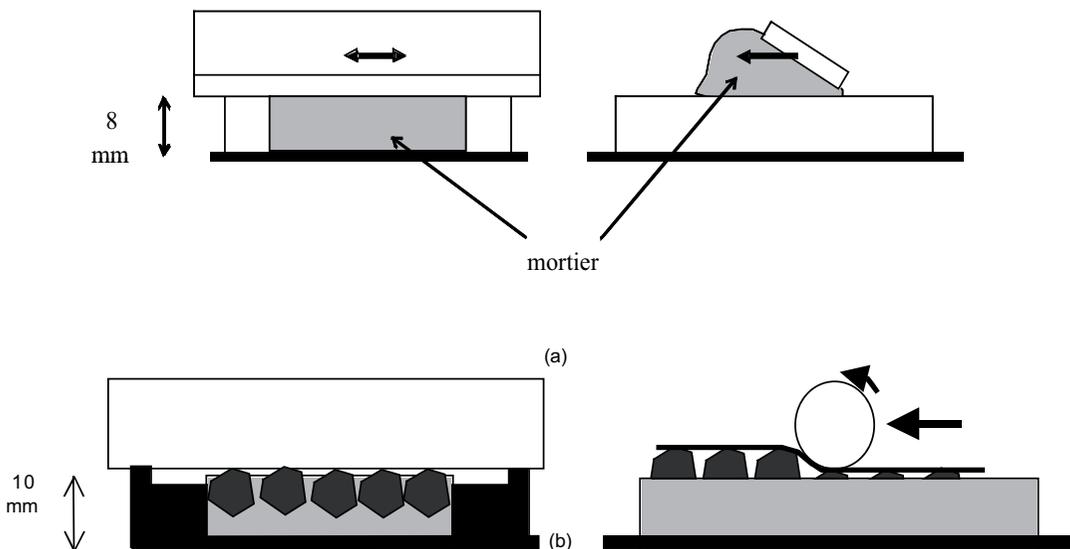
être sujette à un séchage rapide, endommageant la liaison avec les particules. Une nouvelle méthode (procédure C) a donc été développée : elle a consisté à mouiller les particules de façon à atteindre « l'état saturé, surface sèche », puis à épandre manuellement la même quantité de particules sur le mortier frais. La surface a ensuite été compactée et soigneusement finie à la truelle, afin que les particules soient enchâssées sur environ la moitié de leur diamètre.

Figure 5.5. Aspect de la surface de bitume après traitement (grenailage + tranchée d'ancrage)



Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

Figure 5.6. Mise en œuvre de l'EHFG en laboratoire (procédure B)



Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

Les éprouvettes de laboratoire fabriquées selon les procédures A et C ont été curées par la mise en place d'une toile humide pendant 48 heures. Elles ont ensuite été maintenues en conditions ambiantes pendant 28 jours. Pour des applications semi-industrielles, une feuille en polyéthylène a été placée sur le revêtement d'EHFG pendant deux à trois jours ou bien un produit de cure a été pulvérisé après la mise en œuvre des gravillons.

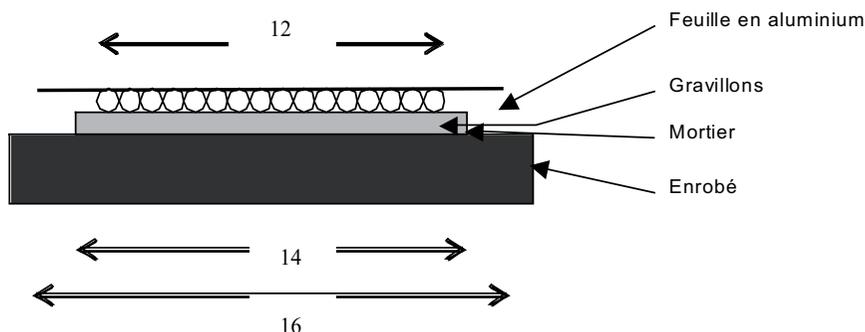
5.7 Essais de fissuration sur bandes (LCPC, France) [Rapport EHFG 6, 7, 13]

Des essais de fissuration ont été réalisés pour déterminer le type et la quantité nécessaires de fibres. L'EHFG a été mis en œuvre à l'extérieur, en bandes de 14 cm de large, sur une vieille chaussée existante. La procédure de fissuration naturelle a été contrôlée pendant quelques mois. Des essais préliminaires ont montré que les bandes de 6 mètres de long étaient plus utiles que les bandes de 3 mètres pour mettre en évidence le modèle de fissuration typique d'une longue chaussée. Par la suite, deux séries de bandes ont été mises en œuvre, la première en 2005 et la deuxième en 2006.

Série d'essais réalisés en 2005

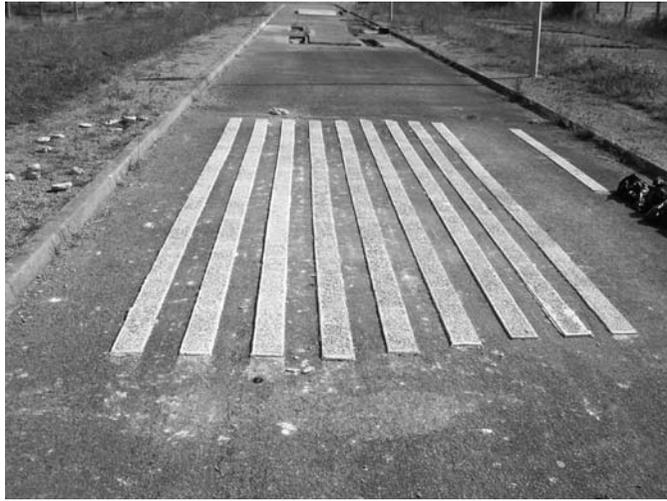
La procédure de mise en œuvre a été la même qu'en laboratoire et la procédure d'insertion des gravillons a été la B (voir Figure 5.7). Les deux types de fibres (acier et PVA) ont été incorporés au mortier B dans une proportion de 0 %, 1 %, 2 % et 3 %. La Figure 5.8 montre le site d'essais au LCPC. Cette chaussée de 30 ans était composée d'une couche de béton bitumineux de 5 cm, d'une couche de base en matériaux traités aux liants hydrauliques de 20 cm et d'une couche de fondation granulaire. Les bandes ont été mises en œuvre sur une section monolithe de cette chaussée, entre deux fissures transversales. Pour cette série d'essais, la surface de bitume n'a été lavée qu'à l'eau, sans traitement visant à améliorer la rugosité de surface.

Figure 5.7. Dimensions transversales des bandes de fissuration [cm]



Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

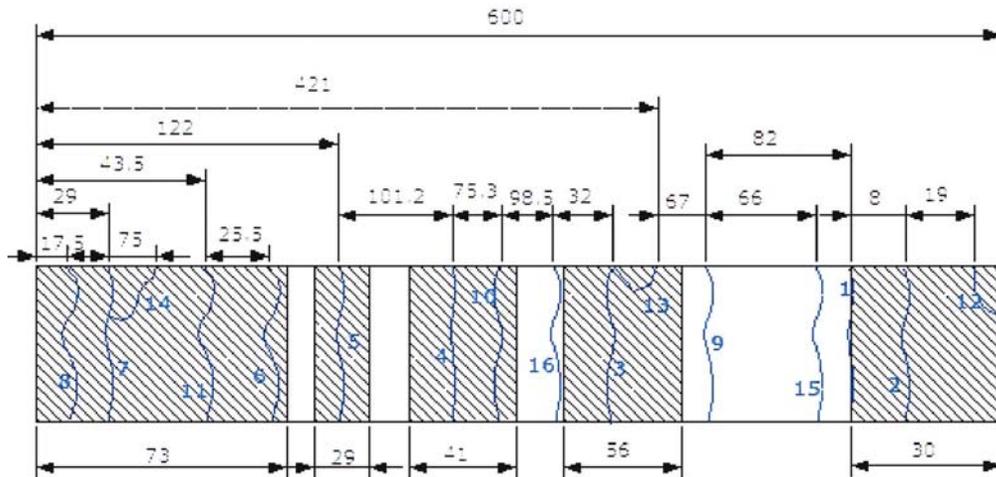
Figure 5.8. Site des essais de fissuration sur bandes au centre de Nantes du LCPC (France)



Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

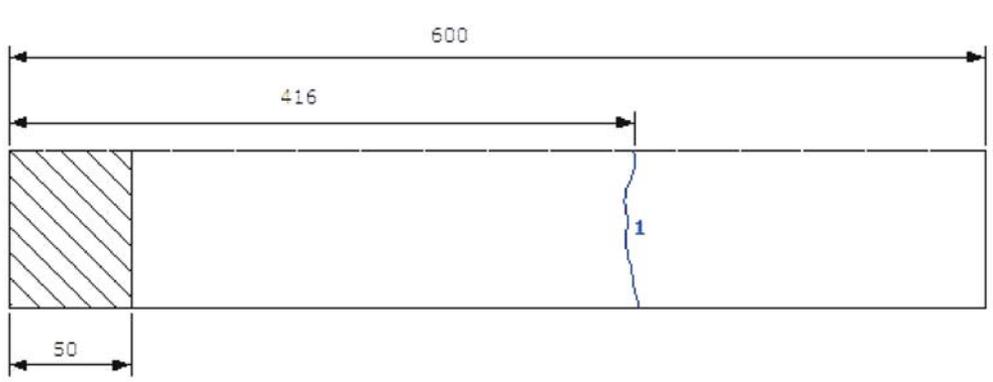
Les bandes ont été curées à l'aide d'une feuille en aluminium et d'une feuille en polyéthylène pendant les premières 48 heures après le coulage. Elles ont ensuite été exposées aux conditions ambiantes. La plupart des fissures sont apparues au cours du premier mois, en raison du développement rapide du retrait (voir section 5.4). À proximité des fissures, une certaine dégradation de la liaison avec la couche de bitume a pu être détectée en tapant légèrement sur les bandes à l'aide d'un marteau ; les parties décollées produisaient un bruit d'une fréquence inférieure. Des exemples de fissuration et de délaminéation sont illustrés sur les Figures 5.9 et 5.10, où les hachures montrent les zones délaminées.

Figure 5.9. Bande de fissuration témoin [cm]



Source : Danish Board of Technology (Denmark).

Figure 5.10. Bande de fissuration comprenant 3 % de fibres d'acier [cm]



Source : Danish Board of Technology (Denmark).

La bande témoin s'est fortement fissurée et délaminée. Cependant, l'incorporation de 3 % de fibres d'acier a presque totalement supprimé le processus de fissuration et de délamination.

La délamination ne s'est produite que sur une des deux extrémités de la bande et la fissuration n'a fait que 5 à 6 cm de long. Les données de fissuration pour toutes les bandes, mesurées à 28 jours, sont résumées au Tableau 5.9.

Bien qu'utiles, ces résultats n'ont pas paru totalement satisfaisants. Une autre série d'essais a donc été lancée l'année suivante.

Tableau 5.9. Données de fissuration (série d'essais de 2005)

Planches	Nombre de fissures	Ouverture cumulée [mm]	Ouverture moyenne [mm]	Ouverture maximale [mm]	Longueur délaminée [%]	Longueur délaminée, sauf extrémité des bandes [%]
Contrôle	11	2.95	0.27	0.60	38	32
Pré-fissurées	2	0.40	0.20	0.20	65	62
1 % d'acier	4	0.65	0.16	0.20	17	11
2 % d'acier	5	1.25	0.25	0.50	20	20
3 % d'acier	1	< 0.10	< 0.10	< 0.10	8	0
1 % de PVA	3	1.30	0.43	0.50	35	29
2 % de PVA	4	0.90	0.23	0.30	52	50
3 % de PVA	6	0.70	0.12	0.20	16	7

Série d'essais réalisés en 2006

Pour cette nouvelle série d'essais, les paramètres adoptés ont été les suivants :

- La surface de bitume a été grenillée avec des billes d'acier, afin d'améliorer la macrotexture et la microtexture, et de renforcer ainsi la liaison à l'interface béton-bitume.

- Le mortier a été rendu plus fluide à l'état frais en augmentant légèrement les dosages en superplastifiant et eau (développement du mortier C).
- Les bandes ont été coulées avec 3 % de fibres d'acier, ainsi que 0 %, 3 %, 4 % et 5 % de fibres de PVA.

Après 42 jours, le premier relevé a été effectué : il n'a montré aucune fissure sur les bandes avec 4 % et 5 % de fibres de PVA ni sur la bande avec fibres d'acier. Aucune délamination n'a été trouvée sur une quelconque bande, pas même sur la bande témoin non fibrée. Ces observations ont conduit les partenaires du projet à choisir une solution avec 4 % de PVA pour le reste des travaux, qui se sont centrés essentiellement sur la caractérisation des performances, décrite aux sections 5.8, 5.10, 5.12 et 5.14 du présent rapport.

Cinq mois après le coulage, le site d'essais a été exposé à des températures élevées, en raison des conditions météorologiques. Ces températures ont soit accéléré la vitesse de retrait du mortier, soit provoqué un gonflement des couches voisines. Une autre conséquence possible a été un certain ramollissement des fibres de PVA, même si la température ne semble pas avoir influé sur leur résistance (voir Tableau 5.5 à la section 5.3). Le phénomène a entraîné une amplification soudaine de la fissuration. Finalement, toutes les nouvelles bandes se sont fissurées, sauf celle comprenant 3 % de fibres d'acier (voir Tableau 5.10). Il est remarquable qu'aucune délamination ne se soit produite, malgré les nombreuses fissures observées sur certaines bandes.

Tableau 5.10. **Données de fissuration à 218 jours (série d'essais de 2006)**

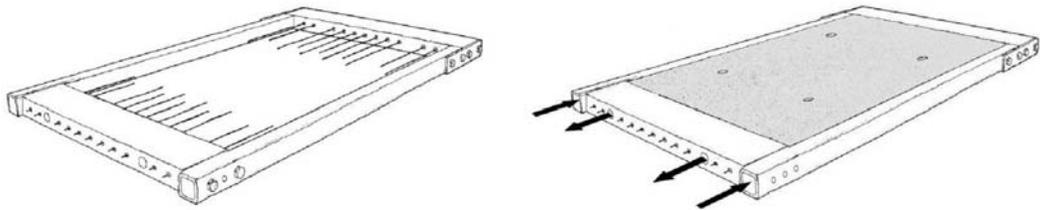
Planches	Nombre de fissures	Ouverture cumulée [mm]	Ouverture moyenne [mm]	Ouverture maximale [mm]	Longueur délaminée [%]
3 % d'acier	0	0	0	0	0
3 % de PVA	7	2.3	0.33	0.6	0
4 % de PVA	10	2.0	0.20	0.5	0
5 % de PVA	4	0.7	0.18	0.2	0

Selon ces résultats, le choix initial de fibres de PVA était erroné : parmi les solutions étudiées, seul l'EHFG comprenant 3 % de fibres d'acier a semblé capable d'assurer une couche de roulement continue, sans fissures visibles.

5.8 Essais de fissuration par retrait empêché et élongation imposée (DBT, Danemark) [Rapport EHFG 19]

En complément des essais de fissuration mentionnés, il a été décidé au cours de l'étude d'effectuer des essais de laboratoire dans lesquels le mortier serait d'abord soumis à un retrait empêché jusqu'à 28 jours, puis à une élongation imposée allant jusqu'à 0.3 %. L'absence d'une liaison avec une couche de base rigide, l'épaisseur de la plaque et l'absence de gravillons enchâssés explique que cet essai ait été relativement sévère. Toutefois, un matériau réussissant cet essai, c'est-à-dire ne présentant aucune fissure d'une largeur supérieure à 0.2 mm, sous élongation maximale, garantirait une solution particulièrement fiable.

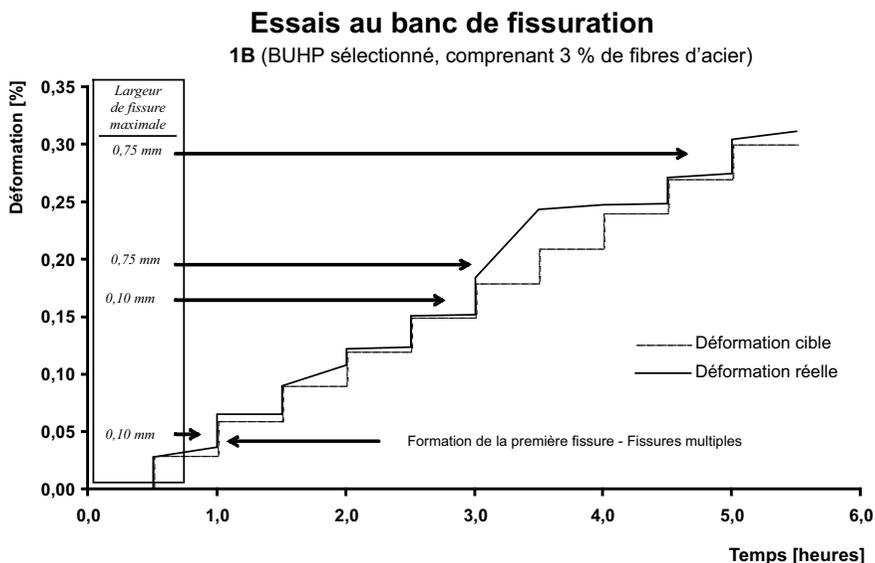
Figure 5.11. Cadre en acier (30 x 500 x 800 mm) avant moulage et pendant l'essai



Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

Le mortier a été arrimé aux extrémités d'un banc de fissuration, par une série de goujons (voir Figure 5.11). L'élongation moyenne a été mesurée au milieu du banc, pendant le cycle de chargement. Le mortier C, avec une légère addition d'eau ($e/c = 0.22$) a été utilisé avec des fibres d'acier (2 %, 3 % et 4 %) ou de PVA (2 %, 4 % et 6 %). Un mortier de plus faible résistance, avec une résistance cible en compression de 50 MPa, a également été testé dans le cas où le mortier d'EHFG aurait une résistance à la traction trop élevée pour pouvoir montrer une fissuration distribuée. La Figure 5.12 montre un programme de chargement typique, où la déformation de l'éprouvette est augmentée pas à pas, pour créer un développement progressif des fissures. Les résultats des essais sur le mortier sont indiqués au Tableau 5.11.

Figure 5.12. Déformation d'un mortier d'EHFG contenant 3 % de fibres d'acier, au cours de l'essai de fissuration



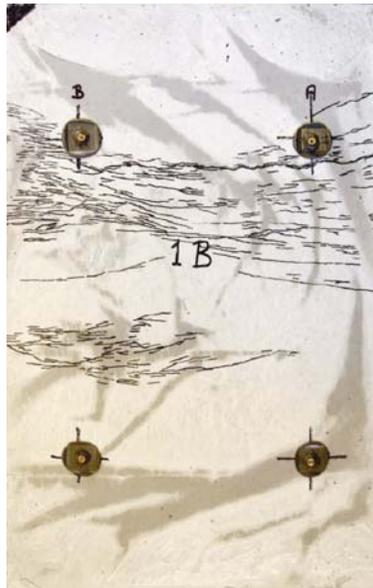
Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

Un modèle de fissuration bien distribuée, comme illustré sur la Figure 5.6, a été obtenu avec seulement 3 % ou 4 % de fibres d'acier dans le mortier d'EHFG. Pour de nombreuses autres éprouvettes, une rupture localisée s'est produite avant la fin de l'essai, notamment sur le mortier de plus faible résistance, dans lequel les fibres n'étaient apparemment pas bien ancrées. Dans tous les cas, l'ouverture de fissure maximale était plus grande que les prévisions initiales de 0.2 mm. Ces essais ont tendu à promouvoir les solutions d'EHFG présentant un pourcentage élevé de fibres d'acier (3 % ou 4 %), dans lesquelles l'ouverture de fissure sur le terrain pourrait être inférieure à celle mesurée pendant les essais.

Tableau 5.11. **Résumé des résultats des essais (matrice d'EHFG)**

N° de l'essai	Matrice	Fibres d'acier [%]	Fibres de PVA [%]	Nombre de fissures	Ouverture de fissure maximale (*) [mm]	Remarques
A	EHFG	2	-	Fissures multiples dans une zone restreinte	1.4	
1B	EHFG	3	-	Fissures multiples dans une vaste zone	0.75	
1C	EHFG	4	-	Fissures multiples dans une vaste zone	0.70	
1D	EHFG	-	2	3 zones de fissuration développées à l'extrémité des barres d'acier filetées permettant le transfert de charge	Aucune fissure développée avant la rupture de l'éprouvette	Rupture de l'éprouvette hors de la zone de mesure, sous déformation de 0.03 %
1E	EHFG	-	4	4 zones de fissuration développées à l'extrémité des barres d'acier filetées permettant le transfert de charge Quelques fissures fines au bord de la zone de mesure	Aucune fissure développées avant la rupture de l'éprouvette	Rupture de l'éprouvette hors de la zone de mesure, sous déformation de 0.03 %
1F	EHFG	-	6	Multiplés fissures fines aux bords de la zone de mesure	1.10	Rupture de l'éprouvette hors de la zone de mesure, sous déformation de 0.03 %

Figure 5.13. Modèle de fissuration final sur EHFG contenant 3 % de fibres d'acier



Source : Roads and Traffic Authority (Australie).

5.9 Essais de fissuration en vraie grandeur (NSW RTA, Nouvelle-Galles du Sud, Australie) [Rapport EHFG 15]

Après les essais de fissuration en laboratoire indiqués ci-dessus, il a été important d'évaluer la tendance à la fissuration du matériau EHFG en vraie grandeur, à l'aide d'un modèle d'essai représentatif d'une chaussée réelle. Suite aux contacts pris avec la direction des routes et de la circulation de Nouvelle-Galles du Sud (NSW RTA), il a été décidé de construire une piste d'essai de 20 m x 2 m, près de Sydney. Selon le calendrier initial du projet, la piste devait être coulée pendant l'été australien (fin 2005-début 2006) et contrôlée pendant six mois. Cela aurait permis d'observer l'effet de la baisse des températures. Cependant, en raison de retards pris dans les travaux précédents et les livraisons de matériaux, la piste a finalement été coulée pendant l'hiver australien. Une voie en bitume construite pour l'occasion, composée d'un béton bitumineux de 20 cm d'épaisseur, a été mise en œuvre sur un matériau de base granulaire à granulométrie continue de 15 cm (voir Figure 5.14). La surface de bitume a été grenailée, pour une macrotexture comprise entre 1 et 1.5 mm. L'uni de surface n'a pas pu être entièrement contrôlé, ce qui a provoqué quelques effets de dispersion dans l'épaisseur de l'EHFG.

Le mortier C contenant 4 % de PVA a été fabriqué et mis en œuvre sur la couche de bitume (voir Figure 5.15). Le dosage en eau a été augmenté jusqu'à un rapport eau/ciment d'environ 0.24, afin d'accroître la fluidité du mélange et d'accélérer la procédure de malaxage (dont la durée n'a pu être inférieure à 15 minutes par gâchée). Cet ajout d'eau a probablement augmenté le retrait libre du mélange ; la résistance mesurée du cylindre à 28 jours a été d'environ 76 MPa, alors que le mélange initial affichait 129 MPa (voir Tableau 5.5). Toutefois, ces mesures de la résistance ne peuvent pas être directement comparées à celles du matériau de référence, en raison des différences dans le régime de cure et probablement dans les conditions d'essai du cylindre. Une baisse de la résistance à la compression de 30 % pourrait avoir été prévue, selon le Tableau 5.6.

La piste a été coulée en sections successives de 2.5 m de long (voir Figure 5.16), séparées par des « joints froids ». Les gravillons ont été insérés selon la procédure C. Un produit de cure disponible sur le marché a été pulvérisé trois heures après le malaxage de l'EHFG. La fissuration a été contrôlée de manière hebdomadaire. D'août à novembre 2006, la température a été comprise entre 3° C et 39° C, et le taux d'évaporation a varié entre 0.5 et 8 mm par jour.

Figure 5.14. **Vue du site d'essai sur le site de la NSW RTA, à St Marys, avec la piste d'essai en bitume terminée**



Source : Roads and Traffic Authority (Australie).

Figure 5.15. **Vue des gâchées 1 et 2 (en partant de la gauche), mises en œuvre immédiatement après le malaxage**



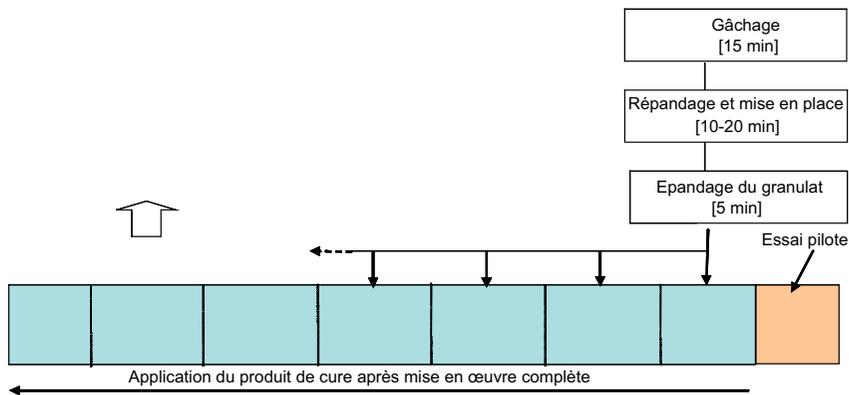
Source : Roads and Traffic Authority (Australie).

Au vu des derniers résultats des essais de fissuration sur bande étroite, pour la formulation avec 4 % de PVA (voir Tableau 5.8), une légère fissuration transversale avait été prévue. En fait, quelques fissures sont apparues assez rapidement. Cette apparition précoce a probablement été liée aux températures élevées du site d'essai australien, par rapport à celles du site français. L'ouverture des fissures obtenues (de 0.4 à 1.2 mm) est plus surprenante.

Plusieurs facteurs, qui rendent cette solution manifestement inacceptable pour une chaussée à longue durée de vie, peuvent expliquer ce résultat, à savoir :

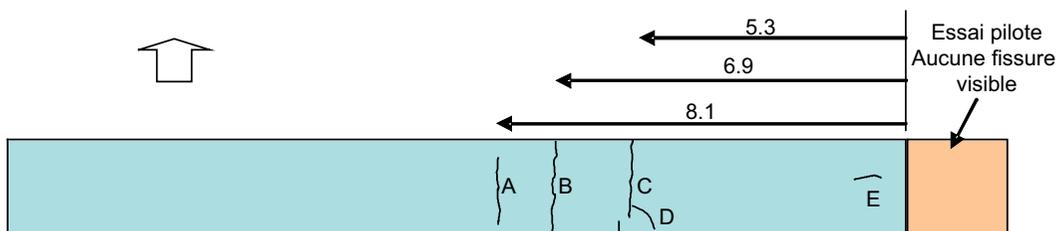
- le dosage en eau du mélange ;
- la présence de joints froids, qui peut expliquer la fissure A (voir Figure 5.17) ;
- une certaine irrégularité dans l'épaisseur de la couche d'EHFG, qui pourrait avoir entraîné une concentration des contraintes dans les zones les plus épaisses de la piste ;
- le caractère probablement plus souple du béton bitumineux par rapport à celui de la piste du LCPC, qui avait 30 ans d'âge lorsque l'EHFG a été mis en œuvre et dont le module et la résistance à la traction étaient probablement élevés, en raison du vieillissement du bitume sur une si longue période.

Figure 5.16. Séquence de construction adoptée pour les essais, montrant la durée moyenne de chaque étape



Source : Roads and Traffic Authority (Australie).

Figure 5.17. Vue schématique des modèles de fissuration sur la piste d'essai (voir réf.)



Source : Roads and Traffic Authority (Australie).

Tableau 5.12. **Observations détaillées des fissures, enregistrées au 25 septembre 2006 (voir réf.)**

Désignation de la fissure	Calendrier (semaines)	Description ¹
A	1.5	Fissure de 0.7 mm d'ouverture sur la largeur totale de la piste.
B	1.5	La fissure la plus visible fait environ 1.0 mm d'ouverture sur au moins 400 mm de sa longueur. Cette fissure, présentée sur la figure 5.18, est constituée d'environ 4 fissures discontinues mais qui, dans leur ensemble, forment une fissuration sur toute la largeur de la piste.
C	1.5	Cette fissure commence sur le bord nord et serpente de manière discontinue, dans le sens transversal. L'ouverture maximale de la fissure est de 1.2 mm.
D	3	Cette fissure est apparue à 350 mm à l'est de la fissure C et rejoint la fissure C à 400 mm du bord.
E	3.5	Une fissure de 300 mm de long est apparue à 600 mm du bord nord et à 500 mm du début de la piste. L'ouverture de la fissure varie, mais est d'environ 0.4 mm.
F, G	8 < T < 28	Minces fissures tardives, de 0.1-0.3 mm d'ouverture (ne figurent pas sur l'illustration)

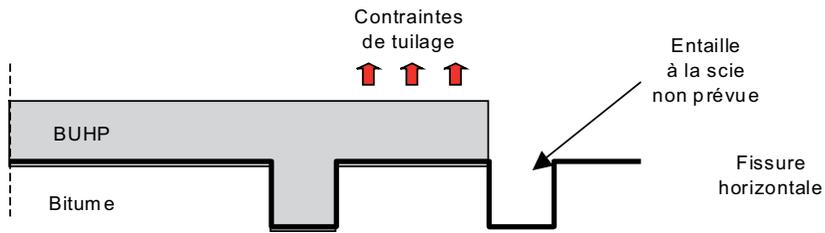
Remarque 1 : Le calendrier se rapporte à la première apparition de la fissure après mise en œuvre de l'EHFG.

À part la fissuration verticale, quelques fissures horizontales (dans la partie supérieure du bitume) se sont produites sous la piste (voir figure 5.18). Elles sont probablement liées à une tendance au tuilage de l'EHFG, qui a créé quelques contraintes de traction verticales dans la couche de base. Les zones de bord de la couche bitumineuse sont de moindre qualité, en raison d'un compactage limité et d'une deuxième entaille à la scie, réalisée par erreur, parallèlement à la première entaille, permettant d'ancrer l'EHFG dans l'enrobé bitumineux. En dehors de ces zones, aucune délamination n'a été détectée sur la piste d'essai.

Quelques conclusions importantes peuvent être tirées de ces essais à l'échelle semi-industrielle :

- L'EHFG comprenant 4 % de fibres de PVA ne peut résister aux fissurations induites par le retrait sans localisation de la déformation, comme l'ont déjà montré les deux séries d'essais de fissuration précédentes.
- Il est important d'utiliser en couche de liaison, au-dessous de la couche d'EHFG, un béton bitumineux suffisamment rigide, d'un compactage et d'une qualité homogènes.
- L'épaisseur de l'EHFG doit être aussi régulière que possible, afin d'éviter les concentrations de contraintes dans les zones plus minces.

Figure 5.18. Fissures horizontales sur les bords de la piste

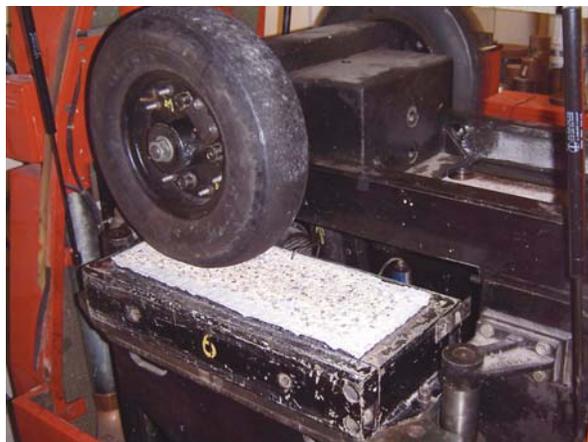


Source : Roads and Traffic Authority (Australie).

5.10 Essais préliminaires de décappage (LCPC, France) [Rapport EHFG 11]

Les essais préliminaires de décappage avaient pour objectif de faire une première évaluation du comportement de l'EHFG soumis au trafic de poids lourds, à l'aide d'un ornièreur traditionnel (voir Figure 5.19). Des éprouvettes sandwichs ont été fabriquées (mortier A comprenant 1 % de fibres d'acier, procédures A et B de mise en œuvre des gravillons) et ont été soumises à un nombre déterminé de cycles (voir Figure 5.20), à température ambiante. Pour certaines séquences, la roue a été placée selon un angle de 5°, afin de créer des efforts de cisaillement pouvant simuler l'effet du trafic dans un virage ou lors d'un freinage. Malheureusement, ce programme de chargement a été limité dans le temps par le degré d'usure du caoutchouc de la roue, dû à un effet abrasif inhabituellement fort, exercé par les gravillons de bauxite calcinée solides et résistants. Cet effet a été relativement sévère après 3 000 passages.

Figure 5.19. Ornièreur du LCPC



Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

Figure 5.20. **Éprouvettes sandwichs typiques d'EHFG coulé sur un prisme en béton bitumineux**



Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

Deux matériaux témoins ont été évalués parallèlement à l'EHFG : un béton bitumineux français typique pour couche de roulement (BBTM) et un enduit en bitume-époxy. Les résultats des essais figurent dans le Tableau 5.13.

Les conclusions sont les suivantes :

- Aucun décollement n'a été observé entre l'EHFG et le béton bitumineux.
- La procédure B a été bien meilleure que la procédure A en termes de prévention de la perte de gravillons. Ultérieurement, la procédure C a été adoptée pour offrir des performances (probablement) encore meilleures (voir section 5.6).
- La perte de matériau a été plus élevée avec l'EHFG (procédure B) qu'avec certains matériaux bitumineux existants. Cependant, l'enduit traditionnel en émulsion de bitume n'a pas été inclus dans le programme d'essais. Ces matériaux de terrain présentent généralement une perte de granulats d'environ 5 % à 10 %, après quelques semaines de trafic.

Les résultats des essais ont été difficiles à interpréter dans leur ensemble, car les programmes de chargement étaient différents selon les matériaux. Par ailleurs, la température ambiante a été favorable aux matériaux bitumineux, puisque le bitume est sensible à la température, contrairement au ciment Portland. Enfin, l'équivalence entre cet essai et les effets du trafic réel est inconnue.

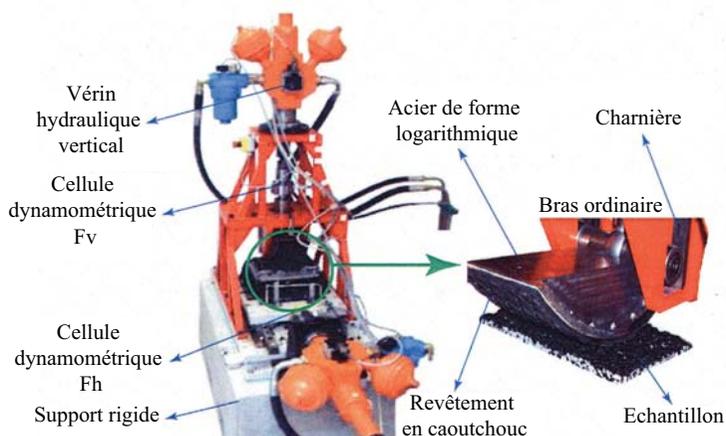
Tableau 5.13. Résultats des essais préliminaires de décapage

Matériau	EHFG (procédure A)	EHFG (procédure B)	Béton bitumineux BBTM	Enduit en bitume époxy
Programme de chargement ⁵	1 000 c. à 0° + 2 000 c. à 5°	1 000 c. à 0° + 2 000 c. à 5° + 8 000 c. à 0°	1 000 c. à 0° + 10 000 c. à 5°	1 000 c. à 0° + 3 000 c. à 5°
Macrotecture initiale [mm]	1.77	1.63	2.25	1.88
Macrotecture finale [mm]	2.01	1.57	1.38	1.89
Perte [kg/m ²]	1.08	0.31	0.11	0.18
Perte [% de gravillons]	18.20	7.50	-	4.50

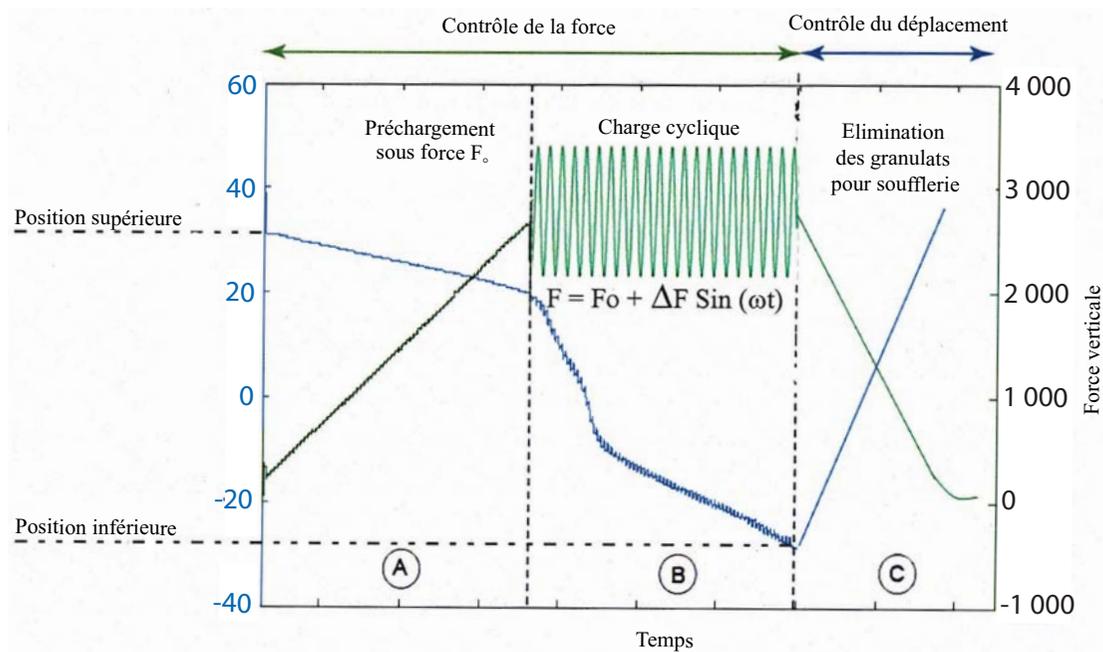
5.11 Essais au tribomètre (LCPC, France) [Rapport EHFG 18]

Un nouvel essai au tribomètre a été récemment mis au point au LCPC, pour reproduire le processus de dégradation d'une couche de roulement en laboratoire. Le fonctionnement du tribomètre est expliqué ci-après. Un bras en acier en forme de spirale logarithmique est recouvert d'un caoutchouc d'une dureté Shore de 68°. Ce bras applique une charge contrôlée sur la surface de l'éprouvette, à un angle constant, simulant l'action d'un pneu de poids lourd au freinage, glissant sur la surface de la chaussée. La Figure 5.21 montre le schéma de l'essai et la Figure 5.22, le programme de chargement. La force moyenne F_0 de 2.5 kN est équivalente à la pression typique exercée par les pneus de poids lourds, tandis que l'amplitude DF est égale à $F_0/3$. Dans le programme d'essais, 3 000 cycles sont appliqués pendant la phase B. Pour chaque éprouvette d'essai, le programme est appliqué deux fois, ce qui fait un total de 6 000 cycles pour chaque essai. La masse de l'échantillon et la macrotecture sont mesurées trois fois : avant les essais, entre les deux programmes et à la fin.

Figure 5.21. Tribomètre du LCPC



Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

Figure 5.22. **Protocole des essais au tribomètre**

Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France).

Deux prismes bitumineux ont été fabriqués et revêtus d'EHFG (mortier C comprenant 4 % de fibres de PVA, procédure C de mise en œuvre des gravillons). Une série de matériaux bitumineux a été testée selon la même procédure :

- « BBTM 0/10 au bitume pur » : matériau standard actuellement pour les couches de roulement autoroutières en France, il est censé durer 7 à 10 ans lorsqu'il est soumis à un trafic lourd.
- « BBTM 0/10 au bitume modifié au polymère SBS réticulé » : semblable au précédent, sauf en ce qui concerne la nature du bitume, ce matériau est souvent utilisé pour les couches de roulement résistantes au trafic lourd, par exemple sur les giratoires.
- « BBTM 0/10 au bitume-époxy » : l'autre candidat pour couches de roulement à longue durée de vie envisagé dans le présent projet.
- « Enduit en bitume-époxy » : ce matériau disponible sur le marché, comme indiqué dans la section précédente (section 5.10), est comparable à l'EHFG, sauf en ce qui concerne la nature du liant (bitume-époxy au lieu de mortier hydraulique).

Les résultats des essais, figurant dans le Tableau 5.14, appellent les remarques suivantes :

- L'EHFG a perdu environ 10 % de sa masse totale de gravillons ; la plupart des particules ont été usées pendant la première série de 3 000 cycles.
- Parmi les matériaux bitumineux, seuls ceux contenant un liant bitume-époxy ont présenté un meilleur comportement.

- Comme dans le cas des essais de décappage, la température (20° C) a favorisé les matériaux bitumineux. À titre d'exemple, un essai au tribomètre a récemment été réalisé sur un autre BBTM 0/10 pendant 1 800 cycles, à deux températures. La perte de matériau a été d'environ 4 kg/m², à 19° C. Cette quantité s'est élevée à 11 kg/m², à 24° C.

Étant donné que la température de surface d'une couche de roulement peut atteindre 50° C en été, l'EHFG pourrait avoir une durée de vie de plusieurs décennies, tout au moins si l'action du trafic est le seul mécanisme de dégradation.

Tableau 5.14. Résultats des essais au tribomètre

	Perte de masse par unité d'aire (kg/m ²)	
	Après 3 000 cycles	Après 6 000 cycles
EHFG / F10-6	0.34	0.39
EHFG / F10-7	0.38	0.42
BBTM 0/10 bitume pur 35-50	0.87	5.09
BBTM 0/10 BmP SBS réticulé	1.73	3.14
BBTM 0/10 bitume-époxy	0.03	0.08
Enduit – Bitume-époxy / F20-4	-	0.03

5.12 Essais d'abrasion (FHWA, États-Unis)

Pour les essais d'abrasion réalisés aux États-Unis, des dalles d'enrobé bitumineux ont été préparées et mises en œuvre avec 8 mm de mortier d'EHFG (formulation C comprenant 4 % de fibres de PVA). Trois gâchées ont été préparées (6061, 6062 et 6063), une par jour. Pour chaque gâchée, une dalle et trois cylindres ont été coulés. Chaque dalle a été coupée en trois éprouvettes, pour les essais d'abrasion. Les cylindres ont été utilisés pour déterminer la résistance à la compression et le coefficient de dilatation thermique.

Différentes méthodes ont été employées pour insérer les granulats de bauxite calcinée (gravillons). La procédure B a été utilisée pour le mélange 6061.

Il a été constaté que les gravillons étaient arrachés pendant les essais d'abrasion. La procédure avec feuille en aluminium a donc été écartée. Pour les mélanges 6062 et 6063, les gravillons ont été placés manuellement dans le mortier, un par un (selon la procédure C, modifiée comme indiqué plus loin). Une feuille de papier a été posée sur la dalle et les gravillons ont été introduits dans le mortier par pression manuelle, d'abord sur le mélange 6062, puis plus fortement sur le mélange 6063. La différence dans l'enclassement des particules obtenu sur les enrobés 6062 et 6063 est indiquée au Tableau 5.15.

Après coulage, les dalles ont été recouvertes d'une toile humide et d'une feuille en matière plastique pendant 48 heures, avant d'être exposées aux conditions ambiantes.

Leur résistance à la compression a été déterminée à 28 jours conformément à la norme ASTM C39, sur deux cylindres de 75 x 150 mm par gâchée. Les mesures ont été comprises entre 121 MPa et 125 MPa, variation proche des valeurs de référence (voir section 5.3).

Conformément à la procédure ASTM C944, la résistance à l'abrasion a été mesurée en fonction de la quantité de béton arrachée de la surface (c'est-à-dire la perte de masse), sur une période donnée, à l'aide d'une fraise rotative à 200 tr/min, sous une force constante de 98 kN. La configuration de l'essai est illustrée sur la Figure 5.23.

Les éprouvettes testées n'étaient pas conformes aux conditions d'essai exigeant que leur surface soit formée ou finie. En effet, celle-ci n'était pas unie, puisque certains gravillons étaient apparents, ce qui a posé quelques problèmes pendant les essais. En conséquence, il n'a pas été possible d'appliquer une pression deux fois plus élevée (197 kN), recommandée pour les bétons hautement résistants.

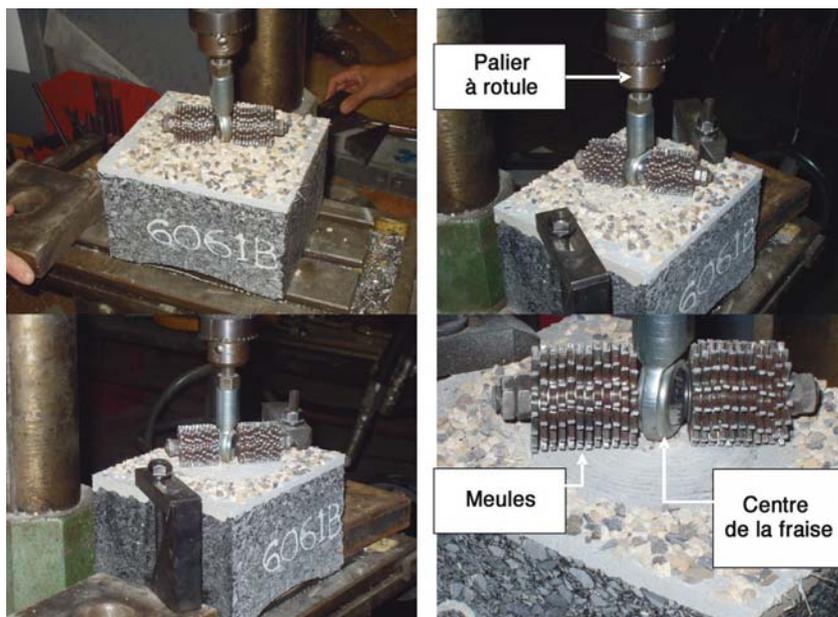
L'abrasion a été réalisée pendant 2 minutes. Les éprouvettes ont ensuite été nettoyées à l'aide d'une brosse souple et la perte de masse a été déterminée. Les éprouvettes ont été testées à différents âges, excepté celles du mélange 6061, qui n'ont été testées qu'à 7 jours.

Un nombre insuffisant d'éprouvettes ont été testées pour tirer des conclusions définitives, mais certaines tendances ont pu être observées. La Figure 5.24 montre une forte corrélation entre la perte de masse (pas nécessairement due à l'abrasion) et la profondeur d'enchâssement des gravillons. Le tableau 5.15 montre la perte de masse et la profondeur d'enchâssement estimée pour toutes les éprouvettes. Il semble également qu'il existe un rapport entre âge et abrasion : la Figure 5.25 montre la perte de masse des enrobés 6062 et 6063 à 14 et 28 jours.

Tableau 5.15. Abrasion de l'EHFG

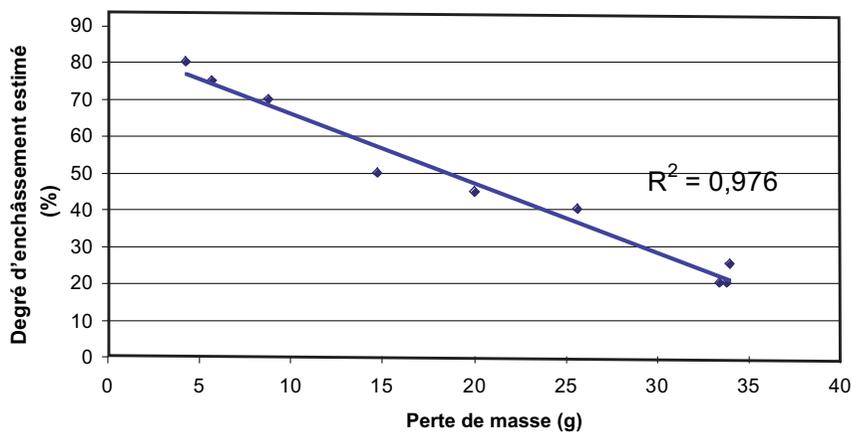
Réf. du mélange	Âge [jours]	Perte de masse [g]	Profondeur d'enchâssement, estimée visuellement [%]	Commentaires
6061A	7	33.8	20	Prémélange OCDE, gravillons de bauxite calcinée. Les gravillons ont été introduits dans le mortier par une légère pression.
6061B	7	34.0	25	
6061C	7	33.4	20	
6062A	14	25.7	40	Prémélange OCDE, gravillons de bauxite calcinée. Les gravillons ont été introduits dans le mortier par une pression modérée.
6062B	14	20.0	45	
6062C	28	14.7	50	
6063A	14	8.8	70	Prémélange OCDE, gravillons de bauxite calcinée. Les gravillons ont été introduits dans le mortier par une forte pression.
6063B	28	5.7	75	
6063C	28	4.3	80	

Figure 5.23. Configuration de l'essai d'abrasion avec fraises rotatives
 La figure montre différentes étapes des mêmes essais réalisés sur une durée de 2 minutes



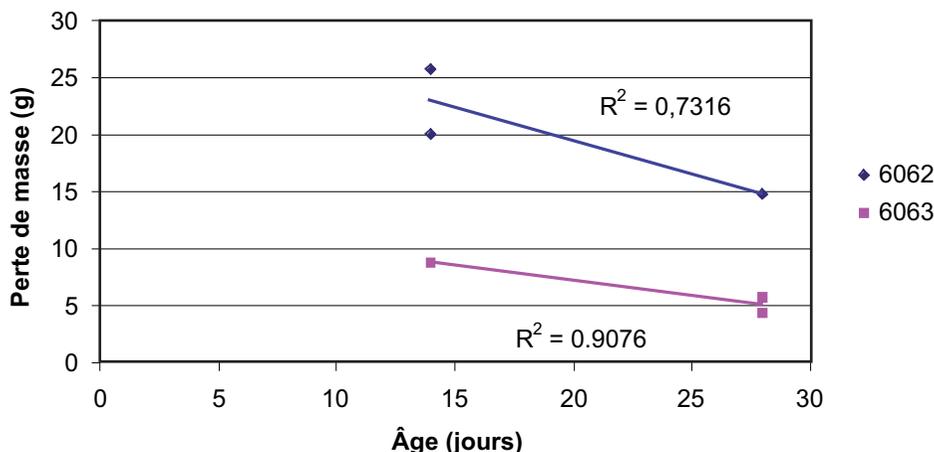
Source : Federal Highway Administration (États-Unis).

Figure 5.24. Corrélation entre perte de masse et degré d'enchâssement estimé des gravillons de bauxite calcinée



Source : Federal Highway Administration (États-Unis).

Figure 5.25. Corrélation entre perte de masse et âge



Source : Federal Highway Administration (États-Unis).

Aucun matériau témoin n'a été utilisé. Il est donc difficile d'interpréter ces résultats. La masse de gravillons initialement mis en œuvre sur la surface à l'aide d'une brosse était de 21 g. Cela signifie que la plupart des particules ont été arrachées sur les séries d'éprouvettes 6061 et 6062, alors qu'environ les deux tiers sont restés sur la troisième série. Converties en profondeur d'abrasion, les performances de cette dernière série sont celles d'un béton à hautes performances (BHP) de niveau 3, selon la classification⁶ de la FHWA. Cette catégorie correspond à un BHP possédant une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 69 MPa. Dans certains pays, comme la Belgique, les bétons utilisés pour les couches de surface d'autoroutes à forte circulation possédant une résistance à la compression de 50 à 70 MPa ont présenté des performances satisfaisantes et n'ont exigé aucun entretien pendant plus de 30 ans.

Enfin, les résultats de ces essais ont rappelé la nécessité que les gravillons soient suffisamment enchâssés dans le mortier, comme l'ont également montré les autres essais de résistance.

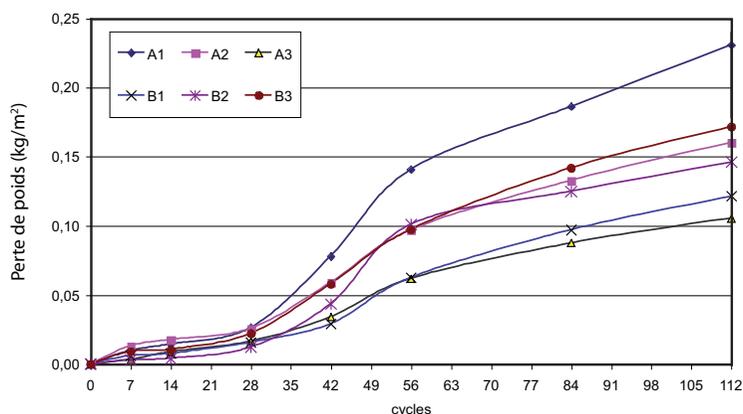
5.13 Essais de gel-dégel (VD, Danemark) [Rapport EHFG 8]

Une couche de roulement en EHFG doit pouvoir résister aux cycles de gel-dégel sans subir de dégradations significatives. Il convient de s'assurer notamment que les gravillons resteront en place et que le matériau de la matrice ne s'écaillera pas pendant les cycles répétés de gel-dégel. Un total de six éprouvettes sandwichs (enduit hydraulique fibré gravillonné sur bitume) ont été soumises à l'essai suédois d'écaillage dû au gel SS 137244, avec une solution de NaCl servant de milieu de congélation. Les éprouvettes ont été exposées à 112 cycles de gel-dégel, à des températures comprises entre + 20° C et - 20° C. Ces éprouvettes avaient préalablement été utilisées pour les essais de décappage (voir section 5.10), c'est-à-dire que les gravillons qui étaient mal fixés avaient déjà été arrachés. Le mortier était de type A et les gravillons avaient été insérés selon la procédure B.

L'écaillage dû au gel (kg/m^2) des six éprouvettes d'essai pendant 112 cycles de gel est illustré sur la Figure 5.26. Certains signes indiquent une accélération de l'écaillage entre les 28^e et 56^e cycles, mais dans la dernière partie de la période d'exposition, l'augmentation de l'écaillage est moins importante. Aucun changement visible superficiel n'est apparu après 112 cycles de gel, à l'exception d'une légère corrosion des fibres d'acier près de la surface.

Presque tous les gravillons de bauxite sont restés en place pendant les essais ; la perte de masse par écaillage a été très limitée. Selon la description de la méthode, une perte de masse inférieure à 0.10 kg/m^2 après 56 cycles est « très bonne » et, avec une valeur moyenne de 0.09 kg/m^2 , le matériau de surface testé entre précisément dans cette catégorie.

Figure 5.26. **Pertes de poids cumulées des six éprouvettes d'essai**
(A1, A2 et A3 concernent le prisme A ; B1, B2 et B3 concernent le prisme B)



Source : Danish Road Institute (Danemark).

De manière générale, ces essais d'écaillage dû au gel n'ont soulevé aucune préoccupation importante concernant la résistance à l'écaillage de l'EhFG.

5.14 Essais combinés d'abrasion, d'attaque acide et de gel-dégel (BAST, Allemagne) [Rapport EHFG 21]

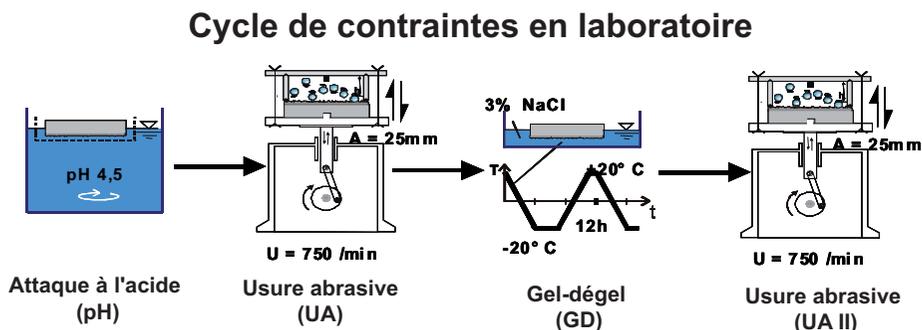
L'essai combiné d'abrasion, d'attaque acide et de gel-dégel est un essai « total », récemment conçu pour évaluer la durabilité d'un revêtement de chaussée en béton sous l'action successive de l'acide, des secousses mécaniques, du gel-dégel, puis à nouveau des secousses mécaniques, comme le montre la Figure 5.27. Dans cet essai, des disques d'EhFG (mortier C comprenant ou non 4 % de fibres de PVA, procédure C de mise en œuvre des gravillons), d'un diamètre de 150 mm, ont d'abord été plongés dans une solution d'acide acétique au pH de 4,5 et à 20° C, pendant une heure.

Une fois la perte de matériau pesée, une série de douze essais d'abrasion d'une durée de 5 minutes ont été appliqués sur la surface centrale des disques, de 105 mm de diamètre, dans une machine où des billes de polyuréthane de 30 mm de diamètre étaient secouées avec une amplitude de 25 mm et à une

fréquence de 750 cycles/min. Entre chaque essai d'une durée de 5 minutes, la perte de matériau a été contrôlée. Les éprouvettes ont ensuite été soumises à 28 cycles de gel-dégel en présence d'une solution comprenant 3 % de chlorure de sodium, entraînant une perte supplémentaire de matériau.

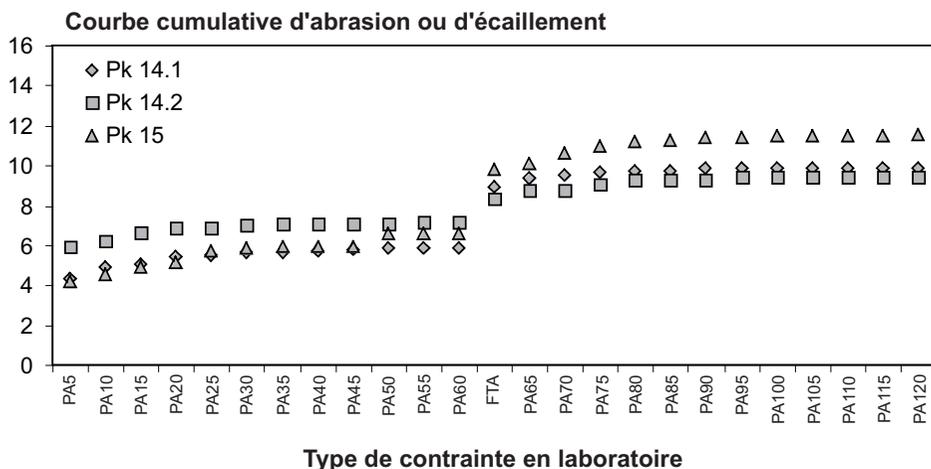
Enfin, une seconde série de douze cycles de secousses, identique à la première, a été appliquée. La perte de matériau a ensuite été mesurée. Le nombre total de cycles de secousses réalisés au cours de cet essai « complet » a été de 90 000. Les résultats obtenus par les éprouvettes comprenant 4 % de fibres de PVA sont indiqués sur la figure 5.28.

Figure 5.27. Séquence de chargements au cours d'un cycle de contraintes en laboratoire



Source : Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Allemagne).

Figure 5.28. Perte de matériau par minute sur trois éprouvettes fibrées



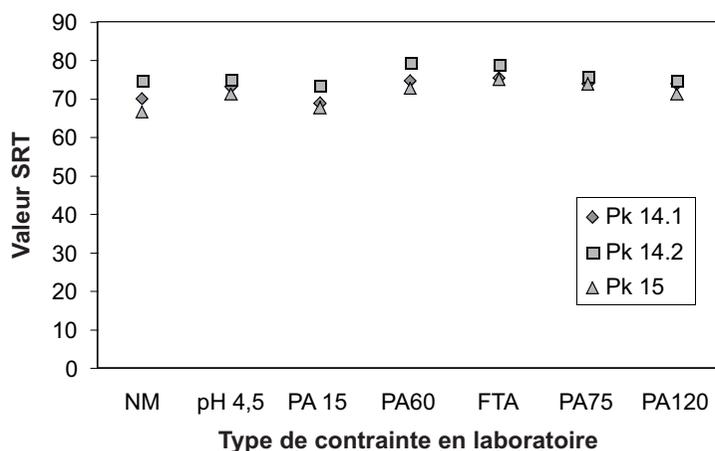
Source : Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Allemagne).

Note : Les premières mesures traduisent l'effet de l'acide, tandis que le décrochement au milieu de la courbe correspond à l'effet des cycles de gel-dégel.

Les valeurs moyennes des pertes de masse après les différentes étapes ont été les suivantes : 5 g (7 % de la surface exposée) par l'attaque à l'acide ; 2 g (3 % de la surface exposée) par le gel-dégel ; environ 3.5 g (10 % de la surface exposée) par les deux séries de secousses. L'attaque à l'acide semble donc endommager sérieusement l'EHFG (il est difficile de trouver confirmation de ces chiffres dans les graphiques, à moins que ces derniers soient cumulatifs).

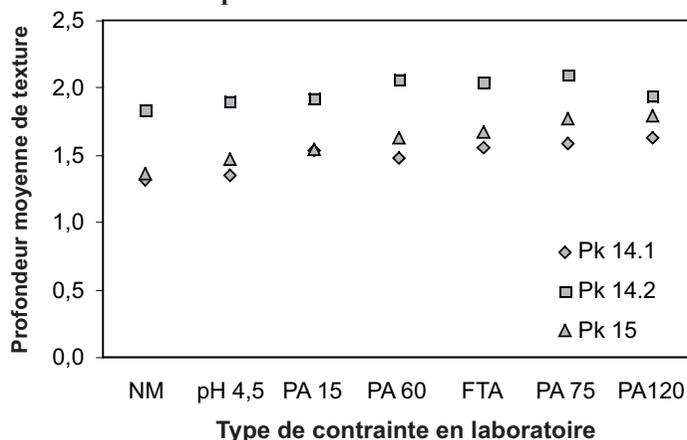
L'adhérence (mesurée avec le pendule SRT) a été contrôlée pendant l'essai (voir Figure 5.29), de même que la profondeur moyenne de texture (mesure au sable vraie selon EN 13036) illustrée sur la Figure 5.30.

Figure 5.29. Évolution de l'adhérence mesurée avec le pendule SRT pendant les séries d'essais



Source : Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Allemagne).

Figure 5.30. Évolution de la profondeur moyenne de texture (selon EN 13036) pendant les séries d'essais



Source : Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Allemagne).

Bien qu'il s'agisse d'un essai très sévère, il a été difficile d'évaluer la durabilité de l'EHFG, étant donné l'absence d'un matériau témoin, tel qu'un béton traditionnel à granulats apparents, dans le programme d'essais. Il convient de remarquer que l'action mécanique des secousses a entraîné une perte de matériau comparable à celle obtenue avec l'essai de décappage (voir section 5.10), tandis que l'action du gel-dégel a créé une légère perte supplémentaire, contrairement à l'essai suédois décrit à la section 5.13.

Cependant, jusqu'à une perte totale de matériau de 20 % de la masse de gravillons apparents, la profondeur moyenne de texture et l'adhérence n'a pas évolué sensiblement. Ce constat vaut également pour les mesures plus précises de la macrotecture et de la microtexture, réalisées pendant cette étude, avec un capteur à double triangulation. On peut en conclure que l'EHFG perdra probablement quelques gravillons sur le terrain, mais tant que cette perte restera inférieure à 20 %, elle ne devrait avoir aucun effet sur l'adhérence ni sur la sécurité des usagers.

5.15 Essais de fatigue (DBT, Danemark) [Rapport EHFG 9]

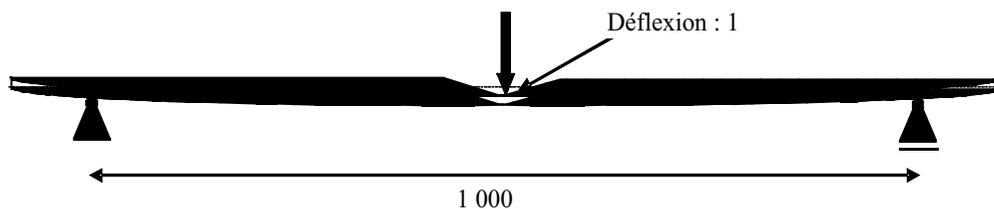
Une série d'essais de flexion sur poutres en mortier a été réalisée en laboratoire pour tester la résistance de la couche de roulement relativement fine à un grand nombre de déflexions répétées. Ces essais avaient également pour objectif de comparer les capacités des deux types de fibres à améliorer la résistance à la fatigue de l'EHFG.

Deux types de couches de roulement ont été testés :

- Mortier A d'EHFG comprenant 2 % de fibres d'acier.
- Mortier A d'EHFG comprenant 2 % de fibres de PVA.

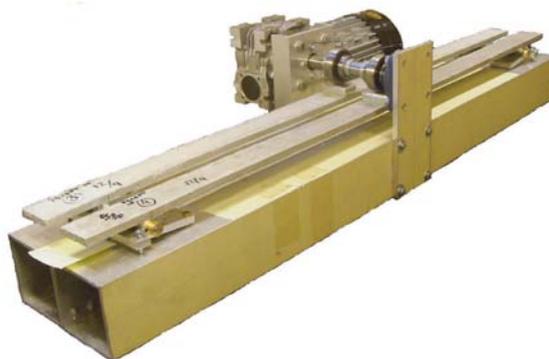
Les essais de fatigue ont été réalisés sur des éprouvettes de 10 x 50 x 1 000 mm. Les poutres ont été soumises en milieu de travée à une déflexion de 1 mm, représentant environ trois fois la déflexion moyenne attendue sur les routes du type ou de la catégorie à l'étude. Le principe de l'essai est présenté sur la Figure 5.31 et la configuration de l'essai est illustrée sur la Figure 5.32.

Figure 5.31. Principe des essais de fatigue



Source : Danish Board of Technology (Danemark).

Figure 5.32. Configuration de l'essai de fatigue



Source : Danish Board of Technology (Danemark).

L'objectif de l'essai était de déterminer l'intégrité du matériau et notamment la performance des fibres face à un nombre élevé de chargements cycliques. Les résultats sont présentés en termes de développement du module d'élasticité équivalent, en fonction du nombre de cycles de chargement. Le module d'élasticité initial, à 28 jours, est le suivant :

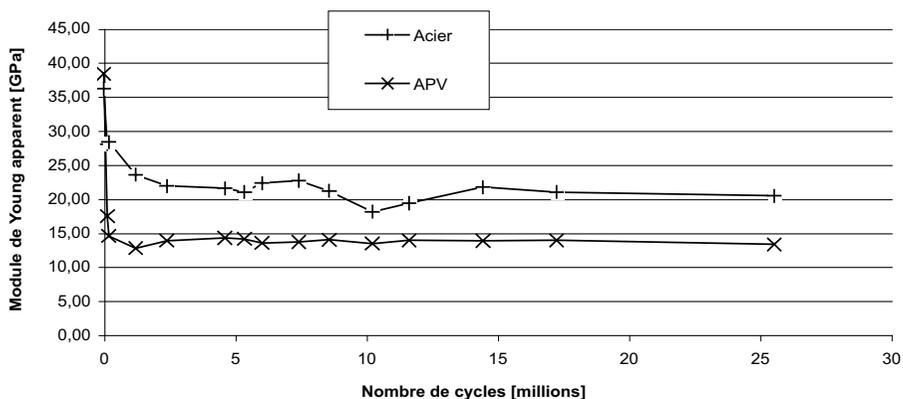
- EHFG, 2 % (vol.) de fibres d'acier : 36 GPa.
- EHFG, 2 % (vol.) de fibres de PVA : 38 GPa.

Ces valeurs sont inférieures à celles mesurées sur les cylindres soumis à une compression (voir Tableau 5.2), qui étaient d'environ 42-43 GPa, mais la différence peut être due à la cure et au type de chargement. Après 25 millions de cycles de déflexion imposée de 1 mm, ces chiffres se sont réduits aux suivants :

- EHFG, fibres d'acier : 21 GPa.
- EHFG, fibres de PVA : 14 GPa.

Sur les deux types de matériau, seule une réduction négligeable a été enregistrée après le premier million de cycles de déflexion imposée. Il a été conclu qu'après la formation initiale de microfissures dans la chaussée, aucune dégradation ultérieure du module d'élasticité ne se produirait pendant la durée de service d'une couche de roulement en EHFG. En ce qui concerne les deux types de fibres, le module d'élasticité de l'acier plus élevé que celui de l'PVA explique probablement que la même variation de valeurs ait été constatée entre les deux matériaux composites correspondants. Toutefois, la stabilité du module apparent après quelques millions de cycles a montré que les deux types de fibres étaient adaptés à la fabrication d'une couche d'EHFG durable. Les résultats des essais sont illustrés sur la Figure 5.33.

Figure 5.33. Résultats des essais de fatigue



Source : Danish Board of Technology (Danemark).

5.16 Essais de fatigue en vraie grandeur (TRL, Royaume-Uni) [Rapport EHFG 14]

L'un des principaux outils d'essais du projet a été l'installation d'essais de chaussée, une machine permettant l'application de cycles de fatigue sur un modèle de chaussée en vraie grandeur, sous température contrôlée (voir Figure 5.34).

Figure 5.34. Installation d'essais de chaussée au TRL



Source : Transport Research Laboratory (TRL) (Royaume Uni).

Bien que la fatigue ne soit pas considérée comme le principal mode de rupture d'une couche de roulement, tout matériau candidat pour couches de surface à longue durée de vie doit être soumis à ce type de chargement, où deux roues simulent un trafic de poids lourds. Il a donc été décidé de tester les deux matériaux du projet (à savoir, l'enrobé au bitume-époxy et l'enduit hydraulique fibré gravillonné) et de comparer leur comportement avec celui d'un enrobé traditionnel de type SMA.

Trois pistes d'essai de 25 x 10 m et d'une épaisseur de 3 m ont été construites. La nature et l'épaisseur des couches supérieures sont indiquées sur la Figure 5.35.

Figure 5.35. Épaisseur des couches liées

Section 3	Section 2	Section 1
SMA époxy 30 mm	Couche de revêtement mince 30 mm	BHP 10 mm
DBM 125 50 mm	DBM 125 50 mm	DBM 125 70 mm
DBM 125 120 mm	DBM 125 120 mm	DBM 125 120 mm

Source : Transport Research Laboratory (TRL) (Royaume Uni).

La structure a été conçue pour supporter un trafic équivalent sans rupture de fatigue, mais le matériau de la couche de base a été choisi pour permettre une légère déformation, afin de tester le matériau de la couche supérieure et l'interface avec la couche de base.

La Figure 5.36 montre les différentes étapes de construction de la piste en EHFG. La profondeur moyenne de texture de la couche de base (en enrobé bitumineux dense) a été de 2.0 mm, une valeur proche de la spécification. Le mortier C comprenant 4 % de fibres de PVA a été gâché avec un rapport eau/ciment de 0.27, donnant une valeur d'affaissement de 24-25 cm. À 28 jours, les résistances à la compression et à la flexion ont été respectivement égales à 86.1 et 25 MPa.

Dans l'installation d'essais de chaussée, il a été appliqué sur les échantillons 255 500 passages de roues, correspondant à une charge de 1 million d'essieux standard, à 20° C, puis une série de passages de la moitié de ce nombre, à 35° C.

La séquence de chargement à température ambiante a provoqué un léger endommagement des structures, limité à quelques ornières. Cependant, après une charge de 0.5 million d'essieux standard à 35° C, l'orniérage a atteint des valeurs plus élevées, respectivement de 8, 6 et 1.5 mm dans l'asphalte coulé gravillonné, le bitume-époxy et l'enduit hydraulique fibré gravillonné (voir Figure 5.37).

Le revêtement SMA n'a présenté aucune fissuration. Concernant l'EHFG, quelques fissures aléatoires, de l'épaisseur d'un cheveu, ont été observées hors de la zone centrale où les gravillons ont rendu ces fissures invisibles.

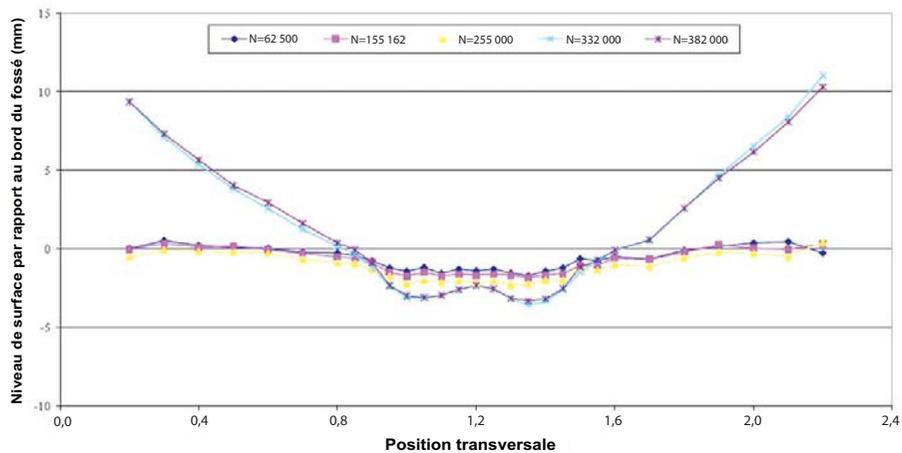
Par ailleurs, une fine fissure longitudinale s'est développée dans l'axe de la piste, entre les deux traces de roues. Une fissure plus large (environ 1 mm) était également visible au même endroit, sur la section en bitume-époxy.

Figure 5.36. Construction de la piste d'essai en EHFG

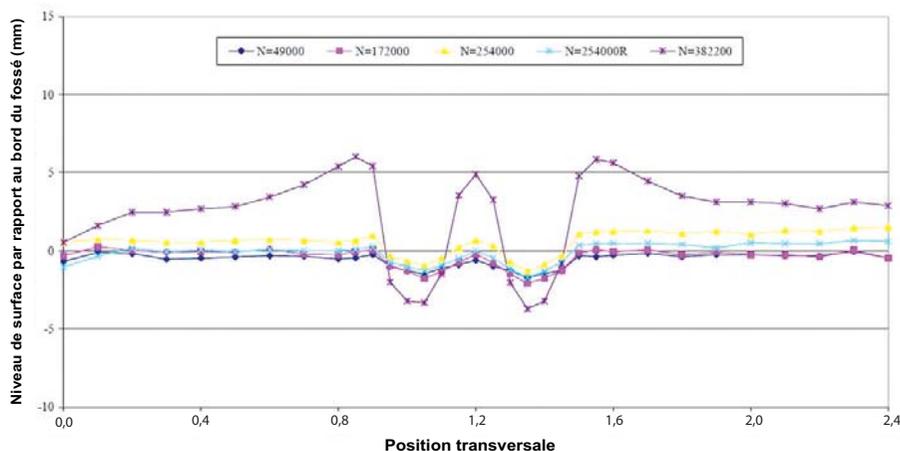


Source : Transport Research Laboratory (TRL) (Royaume Uni).

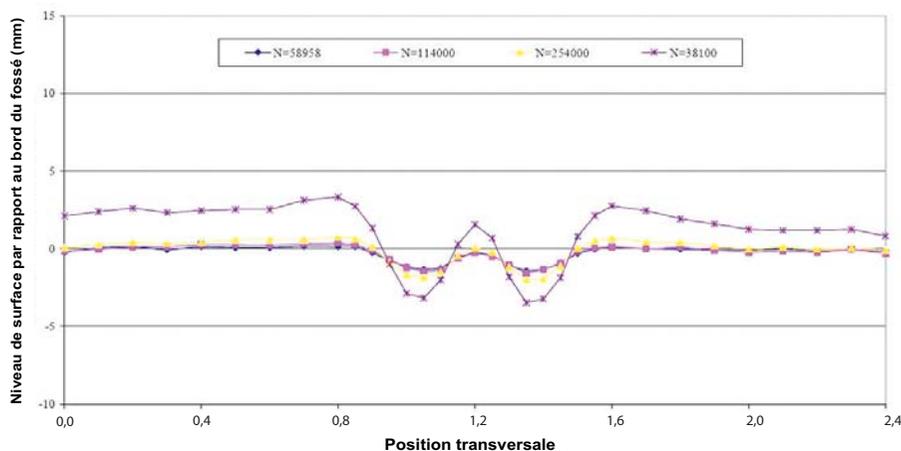
Figure 5.37. Évolution des profils de surface des trois sections de chaussée
Enduit hydraulique fibré gravillonné



Enrobé bitumineux de type SMA



Enrobé au bitume-époxy



Source : Transport Research Laboratory (TRL) (Royaume Uni).

Un type d'endommagement inattendu est apparu sur la section en EHFG, à savoir une délamination du matériau de la couche de base, le long des bords de la piste d'essai (voir Figure 5.38). À première vue, cette rupture pourrait être due au tuilage de l'EHFG, provoqué par un retrait de séchage plus élevé à la surface qu'à la base du matériau. Cependant, on peut voir à la section 5.4 que la part du retrait due au séchage, après quelques semaines, est relativement faible pour l'EHFG. En outre, la courbure des parties décollées de la couche d'EHFG semble plus faible sur la Figure 5.37. Il est donc plus probable que l'orniérage de la couche de base ait entraîné une certaine courbure de l'EHFG soumis aux charges de roues. Cette courbure a induit un moment fléchissant dans la couche d'EHFG. Pour équilibrer ce moment, ainsi que les contraintes verticales induites dans la couche de base, une résistance résiduelle à la traction dans l'enrobé bitumineux dense s'est avérée nécessaire.

Après réalisation de l'essai, la liaison résiduelle entre l'EHFG et la couche de base a été évaluée par une série d'essais de traction sur site, à l'aide d'un carottage à la surface de la couche en matériaux traités aux liants hydrauliques. La rupture s'est toujours produite dans l'enrobé bitumineux, à des niveaux de contrainte de 0.26-0.45 MPa (pour les essais réalisés à température ambiante), la résistance devenant plus faible près des bords. Mais la résistance a été nulle à 35° C. Selon des mesures ultérieures (où des parties de la couche d'EHFG ont été mises en œuvre sur une autre couche de bitume), la température dans les accotements en enrobé bitumineux dense devrait avoir atteint 38° C à 40° C, ce qui correspond à un module d'élasticité d'environ 200 MPa pour ce matériau.

Figure 5.38. **Délamination de l'enrobé bitumineux dense sous les bords de la piste en EHFG**



Source : Transport Research Laboratory (TRL) (Royaume Uni).

En termes de propriétés de surface, la profondeur moyenne de texture de la piste en EHFG a été d'environ 2.2-2.3 mm, bien que la procédure C de mise en œuvre ait été utilisée. Cette texture n'a pas sensiblement changé après une charge de 1.5 million d'essieux standard. L'adhérence a légèrement baissé de 97 à 92 (valeurs SRT), mais est restée plus élevée que pour les deux autres matériaux.

Enfin, mis à part le problème de délamination, le composite EHFG s'est comporté relativement bien dans l'installation d'essais de chaussée, puisqu'il a présenté un niveau d'orniérage très faible et a conservé son intégrité de surface. La délamination a été directement liée à la tendance de l'enrobé bitumineux dense à l'orniérage (une caractéristique à éviter dans une chaussée à longue durée de vie) et à sa sensibilité thermique. Comme les essais de fissuration en vraie grandeur l'ont déjà montré (voir section 5.9), il est essentiel de mettre en œuvre l'EHFG sur une couche de liaison bitumineuse rigide et solide, présentant un orniérage très faible et offrant une certaine résistance à la traction en climat chaud.

5.17 Évaluation du bruit (BAST, Allemagne) [Rapport EHFG 17]

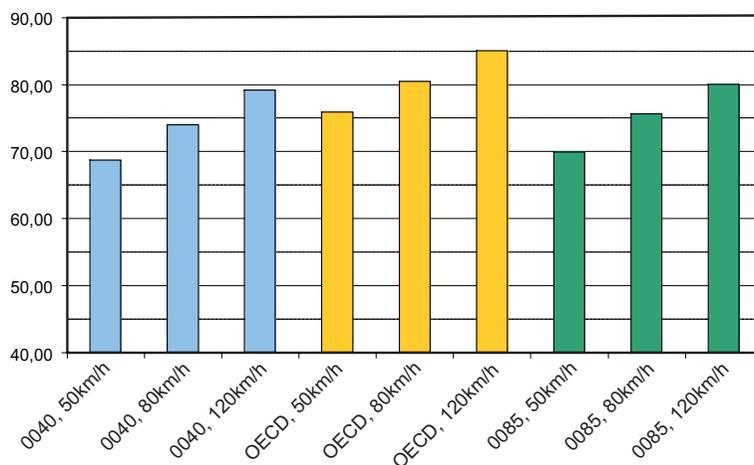
Les émissions acoustiques à l'interface chaussée-pneu constituent une question majeure dans la conception moderne des chaussées. Pour évaluer les caractéristiques acoustiques d'une chaussée, on fait généralement passer un véhicule sur une section d'essai à différentes vitesses et on enregistre le niveau sonore, soit à un endroit fixe près de la chaussée, soit par un micro fixé sur le véhicule. Cependant, aucune section d'essai d'une taille suffisante n'a été construite au cours du présent projet pour permettre de telles mesures. Il a donc été décidé d'utiliser un modèle statistique apportant une

explication physique au bruit de roulement, appelé SPERoN (Statistical Physical Explanation of Rolling Noise). Ce modèle simule l'effet acoustique de la vibration du pneu roulant, en tenant compte de la texture de la route et des propriétés du pneu. Il peut fournir le spectre sonore dans la gamme de 300 à 2 000 Hz.

La texture de la bande d'EHFG comprenant 4 % de PVA, coulée au LCPC (voir section 5.6), a été acquise à l'aide d'un dispositif laser, puis traitée par ordinateur. Le mortier était de type C (voir section 5.3) et les gravillons avaient été mis en œuvre selon la procédure B (voir section 5.6). Bien que la profondeur moyenne de texture n'ait pas été mesurée sur le site d'essais, les valeurs obtenues sur les prismes fabriqués selon les mêmes procédures et utilisés dans les essais de décappage (voir section 5.10) ont été d'environ 1.6 mm. Les résultats des simulations acoustiques sont indiqués sur la Figure 5.39.

Figure 5.39. Comparaison des simulations acoustiques des bandes d'EHFG mises en œuvre au LCPC (colonnes jaunes) et de deux chaussées en béton de ciment désactivé (colonnes bleues et vertes) avec différentes profondeurs de texture

Les émissions acoustiques peuvent être comparées aux résultats habituellement obtenus par la méthode statistique au passage selon ISO 11819-1



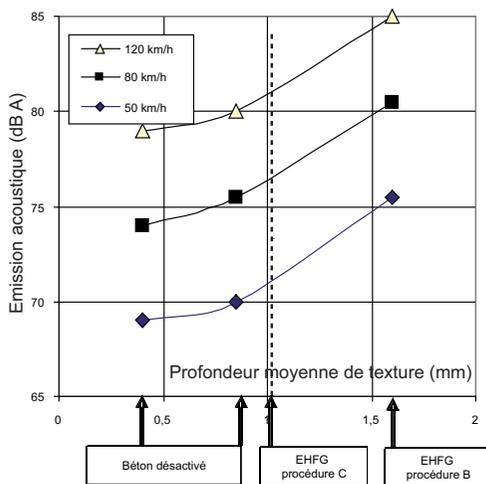
Source : Federal Highway Research Institute (BASt) (Allemagne).

Par rapport aux deux couches de surface en béton désactivé, l'enduit hydraulique fibré gravillonné produirait un niveau de bruit supérieur de 5 dB (A). Il convient cependant de formuler les remarques suivantes :

- Les gravillons ont été épandus selon la procédure B, avec une profondeur moyenne de texture d'environ 1.6 mm. Si la procédure C avait été adoptée, au cours de l'étude, avec une profondeur moyenne de texture de 1.0-1.1 mm, les émissions acoustiques attendues auraient été beaucoup plus faibles, comme le montre la Figure 5.40.
- La profondeur de texture des matériaux témoins a été très faible, en raison des exigences allemandes en matière d'adhérence. Les spécifications françaises prévoient que le béton désactivé doit avoir une profondeur moyenne de texture d'au moins 1 mm.

Ces simulations permettent de conclure qu'il est important de contrôler la profondeur moyenne de texture de l'EHFG, non seulement pour limiter la perte de matériau, mais aussi pour obtenir un niveau sonore situé dans des limites acceptables.

Figure 5.40. Émissions acoustiques selon la profondeur moyenne de texture



Source : Federal Highway Research Institute (BASt) (Allemagne).

5.18 Évaluation des risques de délamination et de flambement (DBT, Danemark ; LCPC, France) [Rapport EHFG 5]

Outre les nombreux essais de matériaux réalisés sur l'EHFG, des calculs ont été effectués pour évaluer la probabilité de certains autres phénomènes de dégradation, notamment la possibilité qu'une charge de trafic favorise la délamination et le flambement en climat chaud.

5.18.1 Analyse élastique

L'analyse élastique a eu pour objectif d'étudier les possibilités qu'une charge de trafic favorise la délamination.

Pour obtenir une estimation préliminaire du comportement élastique d'une fine couche de roulement en béton placée sur une couche de base en bitume, une première évaluation analytique a été effectuée en supposant un comportement élastique linéaire pour le matériau bitumineux. Il convient cependant de noter que cette hypothèse n'est peut-être pas valable, car l'enrobé bitumineux présente, à

certains niveaux de température, un comportement viscoélastique, même lorsqu'il n'est soumis que brièvement à une charge.

L'analyse élastique a indiqué un risque de fissuration longitudinale le long des bords de la chaussée dans les deux matériaux, à savoir le bitume et le béton. De nouvelles études sont en cours de réalisation, mais il semble que dans l'état de l'art, nous ne disposions pas encore de données suffisantes pour une analyse complète et fiable des éléments finis. La réalisation d'essais en vraie grandeur serait donc utile, entre autres, pour évaluer et ainsi confirmer ou infirmer les hypothèses et les analyses indicatives.

5.18.2 Analyse de flambement

La possibilité d'un flambement en climat chaud a été étudiée.

Étant donné que la couche d'EHPG est très mince, la question est de savoir si, en climat chaud, il pourrait s'y produire une compression assez élevée pour créer une instabilité élastique.

En partant de l'hypothèse que la température, au moment de la prise du matériau, est de θ_0 et pourrait s'élever à θ_{\max} pendant une journée d'été, le gonflement équivalent serait alors le suivant :

$$\varepsilon_S = \alpha (\theta_{\max} - \theta_0) \quad (1)$$

où α est le coefficient de dilatation thermique. Avec $\theta_0 = 15^\circ \text{C}$, $\theta_{\max} = 55^\circ \text{C}$ et $\alpha = 1.7 \times 10^{-5} / ^\circ \text{C}$, il s'avère que $\varepsilon_S = 680 \times 10^{-6}$. Cette valeur est égale à une déformation correspondant à l'ouverture de fissure cumulée d'un mortier sans fibre à 28 jours (voir section 3.2).

Sauf en cas d'été chaud dès le premier mois de service (la température initiale supposée serait alors probablement trop faible), le gonflement induit par la température sera donc inférieur au retrait du matériau. Cela signifie qu'aucune contrainte en compression ne devrait apparaître dans la couche d'EHPG. Le risque de flambement semble donc négligeable, au moins dans les climats tempérés.

5.19 Conclusions préliminaires

Cette section présente les conclusions préliminaires tirées des nombreux essais réalisés sur l'EHPG et décrits dans ce chapitre.

Il est clair que des progrès considérables ont été réalisés dans le développement et les essais du concept innovant d'enduit hydraulique fibré gravillonné, proposé comme candidat potentiel pour des couches de roulement à longue durée de vie.

Une formulation initiale, conçue à partir des premières études, a évolué à travers différentes étapes et a été améliorée au cours du projet. Élément important, la conception du mélange a été perfectionnée en fonction des résultats des nombreux essais sur les matériaux, réalisés par les laboratoires nationaux, selon les recommandations des membres du groupe Enduit hydraulique fibré gravillonné.

Le développement et les essais de l'EHPG ont permis d'aborder une série de questions posées au début du projet :

- Comment produire et mettre en œuvre le matériau sur une couche de base ?

- La couche de roulement subira-t-elle une fissuration par retrait empêché ?
- La couche de roulement restera-t-elle fixée à la couche de base ?
- La couche de roulement perdra-t-elle ses gravillons sous l'effet de la charge de trafic ou des conditions climatiques ?
- Une chaussée revêtue d'EHFG subira-t-elle une dégradation imprévue remettant en question ses caractéristiques essentielles de longévité ?

Les procédures proposées et mises en œuvre ont permis à tous les laboratoires d'essais participants de fabriquer et d'utiliser avec succès des matériaux fournis par une même source. Sauf pour la teneur en eau, le même matériau a été employé par tous les participants aux essais en laboratoire, afin de garantir un ensemble suffisamment cohérent de données. Bien que les essais réalisés par les laboratoires aient été tout à fait différents les uns des autres, ils ont permis de dresser un panorama cohérent du comportement de l'EHFG.

Le renforcement par fibres a été conçu pour éviter la fissuration induite par le retrait. Deux types de fibres ont été présélectionnés. Les dosages ont été diversifiés afin de trouver la quantité minimale nécessaire pour éviter toute fissuration visible dans la couche de roulement. En cours d'étude, une solution basée sur l'utilisation de 4 % (en volume) de fibres synthétiques (PVA) a été privilégiée. Ultérieurement, des observations ont montré que ce renforcement ne pouvait pas empêcher une macrofissuration à long terme. Les fibres d'acier, dans une proportion minimale de 3 %, paraissent aujourd'hui préférables.

Quelques améliorations ont également été réalisées dans la formulation du mortier (conduisant à une consistance plus fluide du mortier fraîchement mélangé) et dans les procédures de mise en œuvre du matériau (grenailage et tranchées le long des bords de section de la couche de liant bitumineux). Après l'introduction de ces améliorations et de ces nouvelles procédures de mise en œuvre, il ne s'est produit aucun décollement de la couche d'enduit hydraulique fibré gravillonné pendant les essais, y compris au cours des essais de fatigue équivalant à une charge de 1.5 million d'essieux standard. Il semble que l'association de la résistance et de la rugosité de la surface de bitume, d'une part, avec la résistance de l'Enduit hydraulique fibré gravillonné, d'autre part, permette d'offrir une résistance élevée au décollement. Il convient de souligner cependant que la limitation des machines d'essais de fatigue disponibles, et la durée relativement courte de l'étude n'ont pas permis d'appliquer une charge reproduisant les effets d'un trafic élevé pendant 20 à 30 ans, situation typique pour une couche de roulement à longue durée de vie. Par ailleurs, l'effet du vieillissement du support bitumineux à l'interface avec la couche de base n'est pas connu.

Les mesures ont clairement montré qu'il se produirait, sur une chaussée réelle, une perte de gravillons correspondant à 5-20 % du dosage initial. Élément important, il a été toutefois conclu que ce résultat ne devrait pas modifier sensiblement l'adhérence de la chaussée. Un bon enclassement des gravillons pendant la construction de la couche de roulement est néanmoins essentiel pour limiter la perte de gravillons sous la charge de trafic, ainsi que le niveau de bruit.

Enfin, bien qu'un décollement entre l'enduit hydraulique fibré gravillonné et l'enrobé bitumineux semble improbable, au moins sur le court terme, une légère délamination de la couche de liaison bitumineuse pourrait se produire le long des bords, en climat chaud notamment. Il est donc capital de construire une couche de base solide et rigide, assurant un faible orniérage et compatible avec une couche supérieure mince à module élevé.

Remerciements

Le groupe Enduit hydraulique fibré gravillonné remercie vivement SIKA France (et notamment Isabelle Lallemand-Gamboia), pour ses conseils dans le choix des constituants de l'EHFG, ainsi que pour le conditionnement et la livraison des lots de prémix d'EHFG aux différents laboratoires participants.

LISTE DES RAPPORTS TECHNIQUES EHFG

- [HPCM Report 1] HPCM Material Source. Auteur : F. de Larrard, LCPC, France
- [HPCM Report 2] Selection of Constituents. Revised Report-Auteur : F. de Larrard, LCPC, France
- [HPCM Report 3] Mix Design of the Matrix, thin solution, Auteur : F. de Larrard, LCPC, France
- [HPCM Report 4] Production of Sandwich Samples. Auteur F. de Larrard, LCPC, France
- [HPCM Report 5] Buckling Analysis. Auteur : F. de Larrard, LCPC, France
- [HPCM Report 6] Preliminary Cracking Tests. Auteurs : F. de Larrard and O. Garcin, LCPC, France
- [HPCM Report 7] Series of Cracking Tests. Auteurs : F. de Larrard - O. Garcin, LCPC, France
- [HPCM Report 8] Behaviour at Cold Temperature. Auteur : Finn Thogersen, Danish Road Institute, Danemark
- [HPCM Report 9] Fatigue Behaviour of Matrix + Fibres Auteur : Anders Henriksen, Dansk Belaegnings Teknik, Danemark
- [HPCM Report 10] Abrasion/Wear Resistance. Skid Resistance Measurements -- Auteur: Nina Sliwa, BAST, Allemagne
- [HPCM Report 11] Resistance to Stripping Cement Matrix with Fibre. Auteurs : F. Hammoum, F. Travers, C. de la Roche, O. Burban, LCPC, France
- [HPCM Report 12] Final Mix-Design and HPCM Application Procedures. Auteur : F. de Larrard, LCPC, France
- [HPCM Report 13] Series of Cracking Tests. Auteurs : F. de Larrard and O. Garcin, LCPC, France
- [HPCM Report 14] Application of HPCM Wearing Course on an Asphalt Pavement - semi-industrial scale. Auteur : J. Chandler and A. Badr, TRL, Royaume Uni
- [HPCM Report 15] In Situ Cracking. Auteur : G. Vorobieff, Roads & Traffic Authority, Australie
- [HPCM Report 16] Total Lab Test - Combined Laboratory Stress Cycle Test. Nina Sliwa, BAST, Germany, and Patrick Wenzl, TU Munich, Allemagne

[HPCM Report 17] Evaluation of Noise Emission. Auteur : Nina Sliwa, BAST, and Manuel Männel, Allemagne

[HPCM Report 18] Surface Resistance under Traffic. Auteurs : F. Hammoum, J-P Terrier and O. Burban, LCPC, France

[HPCM Report 19] Crack-frame Testing of Restrained Contracting. Auteurs : Anders Henriksen and Jacob Gulstad, DBT Engineering A/S, Danemark

[HPCM Report 20] Evaluation of Noise Emission. Auteurs : Nina Sliwa and Manuel Männel, Allemagne

[HPCM Report 21] Total Lab Test - Combined Laboratory Stress Cycle Test. Auteurs : Nina Sliwa, BAST, and Patrick Wenzl, TU Munich, Allemagne.

NOTES

1. De Larrard F. et Sedran T. (novembre-décembre 1994), Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil, Note technique, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 194, France. RICHARD P. et al. (mars-avril 1995), Les bétons de poudres réactives (BPR) à ultrahaute résistance (200 à 800 MPa), Annales de l'ITBTP, n° 532, p. 81-143, France.
2. Rasmussen R.O., Rozycki D.K. et al. (2004), Thin and Ultra-Thin Whitetopping – A Synthesis of Highway Practice, NCHRP Synthesis n° 338, TRB, 96 pp., Washington, États-Unis.
3. De Larrard F., Garcin O., Hammoum F. et Travers F. (octobre-décembre 2005), Essais préliminaires d'un enduit hydraulique pour couche de roulement à longue durée de vie, Note technique, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 258-259, p. 121-128, <http://www.lcpc.fr/fr/sources/blpc/index.php#resultats>, France.
4. Rapport total eau/ciment Portland.
5. Le symbole ° désigne l'angle de dérive. 0° désigne le roulement libre.
6. <http://www.fhwa.dot.gov/BRIDGE/hpcdef.htm#1>

6. ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET EXTRAPOLATION DES RÉSULTATS

6.1. Introduction

La réalisation et les résultats des essais présentés aux chapitres 4 et 5 ont porté sur les caractéristiques fondamentales des bitumes époxy et des bétons à hautes performances, ainsi que sur leur résistance aux facteurs externes tels que l'environnement et le trafic. Le présent chapitre examine les conclusions des essais en laboratoire et des essais de chaussée accélérés dans les domaines importants pour la longévité et la durabilité. Il dresse un bilan, lorsque cela est possible, sur les performances probables à long terme des revêtements de bitume-époxy et d'enduit hydraulique fibré gravillonné, dans les conditions susceptibles d'être rencontrées sur le terrain.

Les revêtements de bitume-époxy et d'enduit hydraulique fibré gravillonné devront présenter d'excellentes propriétés fonctionnelles pour atteindre l'objectif d'une durée de service de 30 ans, pratiquement sans entretien. De telles couches de roulement devront se comporter suffisamment bien pour rivaliser non seulement avec les solutions standard actuelles, mais aussi avec les bonnes pratiques qui existeront dans 20 à 30 ans.

Ces deux produits se situent visiblement à différentes étapes de développement :

- Le bitume-époxy est bien plus avancé, puisqu'il constitue une version modifiée d'une couche de roulement en bitume standard, assez largement utilisée sur le terrain, dans des situations particulières (essentiellement sur les tabliers de ponts rigides).
- La couche de roulement en EHFG est un système innovant qui nécessite d'être encore développé avant son lancement à des fins commerciales. L'EHFG comporte donc plus d'incertitudes et d'inconnues à ce stade de développement.

Les estimations et évaluations formulées dans ce chapitre partent de l'hypothèse que les deux matériaux de revêtements peuvent être mis en œuvre à grande échelle avec un niveau de qualité minimum équivalant à celui des différentes éprouvettes testées en laboratoire et sur le terrain (comme indiqué dans les chapitres précédents), c'est-à-dire une fois que toute amélioration dans la construction, souhaitable ou nécessaire, ait été apportée. Les autres questions pratiques qui doivent être traitées concernant la construction sont examinées au chapitre 8.

6.2 Bitume-époxy

L'emploi du bitume-époxy pour les chaussées n'est pas nouveau. Ce matériau possède à son actif de nombreux exemples de développement et d'utilisation pour le revêtement d'importants ponts routiers depuis de nombreuses années.

La première application a été réalisée en 1967 sur le pont San Mateo-Hayward à San Francisco, où le bitume-époxy assure un niveau de service satisfaisant depuis plus de 40 ans. Le matériau a depuis

été employé sur d'autres ponts de longue portée, dans de nombreux pays, où ses excellentes propriétés ont été reconnues.

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.

6.2.1 *Présentation générale*

Les nombreux essais réalisés sur les bitumes époxy 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.

Les essais réalisés dans le cadre du projet permettent de conclure que le bitume-époxy est un excellent matériau, supérieur aux matériaux de revêtements bitumineux traditionnels. Sa résistance élevée lui permet de supporter tous les mécanismes de dégradation qui touchent habituellement les matériaux de chaussées routières. Comme le montre la discussion sur ses propriétés, dans les sections suivantes, ce matériau inspire une grande confiance. L'expérience acquise sur les ponts de longue portée (concernant notamment sa résistance élevée à l'orniérage et à la fissuration par fatigue) conforte cette opinion.

6.2.2 *Module d'élasticité et résistance à la traction*

Le module d'élasticité et la résistance à la traction sont des propriétés particulièrement importantes pour les matériaux de revêtements. Les caractéristiques d'élasticité ou de rigidité jouent un rôle dans les déformations permanentes et l'orniérage, tandis que la résistance à la traction entre en jeu dans la fissuration et la fatigue à basse température. En termes de dimensionnement de chaussées, une rigidité élevée (capacité de répartition des charges) à la température de conception devrait normalement permettre une réduction de l'épaisseur de la chaussée pour un volume de trafic équivalent. Par ailleurs, une sensibilité thermique réduite à température élevée (modification plus faible de la rigidité en fonction de la température), par rapport aux matériaux bitumineux traditionnels, devrait permettre le maintien de ces propriétés intéressantes à des températures ambiantes plus élevées.

Les bitumes époxy ont, immédiatement *après fabrication*, des modules comparables à ceux des matériaux témoins. Cela indique que la capacité de répartition des charges au jeune âge des enrobés époxy est semblable à celle des enrobés traditionnels. Les modules des bitumes époxy acide et amine sont, *après polymérisation*, relativement indépendants de la température et au moins 2 à 5 fois supérieurs à ceux des matériaux témoins (jusqu'à deux fois plus élevés à très faibles fréquences).

Le bitume-époxy affiche de bonnes performances parce que c'est un système réticulé grâce auquel la réaction chimique ou de réticulation peut se faire en partie avec le granulats. En effet, au cours de la réaction du bitume-époxy, le liant se réticule, ce qui entraîne une augmentation des propriétés de rigidité, cohésion et adhésivité. Ce processus de polymérisation peut être d'une durée différente selon le type d'époxy utilisé. Bien que la résistance maximale ne puisse pas être atteinte dès le jeune âge, l'intégrité du matériau devrait être suffisante pour supporter le trafic, à l'instar d'un matériau bitumineux traditionnel qui devient plus résistant en refroidissant.

En raison de sa résistance élevée à la traction par rapport aux matériaux traditionnels, il y a de fortes probabilités que le bitume-époxy assure la durabilité et la longévité du revêtement. En effet, sa résistance pourrait lui permettre, en grande partie, de supporter toutes les formes habituelles de dégradation. Ses performances sur les tabliers de ponts rigides étayent ces conclusions. Concernant cet indicateur, les essais en laboratoire confirment l'intérêt du bitume-époxy pour le revêtement de chaussées autoroutières à longue durée de vie.

6.2.3 *Résistance à la fatigue*

La résistance à la fatigue est essentielle pour un matériau de chaussée, lorsque la charge est particulièrement répétitive et localisée. Bien que les dégradations sur les routes à fort trafic, dues à la fissuration par fatigue associée à la fissuration de haut en bas, soient moins probables sur les chaussées épaisses, il est important que le matériau ait une bonne résistance à la fatigue. De nombreuses études sur la résistance à la fatigue des enrobés de bitume-époxy polymérisés ont été effectuées à l'aide d'essais appliquant des charges répétitives et mesurant le déplacement total.

Sous contraintes élevées, il s'est avéré que la résistance à la fatigue des matériaux HRA et SMA époxy n'était que légèrement meilleure à celle des matériaux témoins. Dans l'installation d'essais de chaussée, aucune dégradation n'a été mise en évidence sur le revêtement de bitume-époxy, bien que les couches inférieures n'aient pas été particulièrement épaisses. Étant donné que le bitume-époxy est beaucoup moins sensible au vieillissement, il est également moins fragile. Il risque moins de subir une fissuration de haut en bas et devrait offrir une meilleure résistance à la fatigue.

Les recherches et les essais ont souligné la nécessité que les couches de chaussée sous-jacentes soient suffisamment solides pour garantir une structure à longue durée de vie, qui puisse résister aux déplacements et aux dégradations.

De manière générale, il s'est avéré que le bitume-époxy était moins sensible à la dégradation par fatigue et ne devrait pas présenter de dommages de ce type à long terme. Il est difficile, sans essais en vraie grandeur, d'indiquer une durée déterminée, mais il est clair qu'un revêtement de bitume-époxy doit s'appuyer sur une chaussée solide, à longue durée de vie, pour que ses performances et sa longévité puissent être assurées.

6.2.4 *Résistance à l'orniérage*

La dégradation due à l'orniérage est une des principales causes d'intervention. Les essais d'orniérage constituent une part importante de toute série d'essais ordinaires sur matériaux de chaussées et ont été un élément essentiel des essais sur le bitume-époxy. Ils ont été réalisés sous différentes températures ; il est donc probable que le bitume-époxy, avec ses caractéristiques thermodurcissables, offre une très bonne résistance aux températures élevées, par rapport aux matériaux bitumineux traditionnels.

La déformation permanente et l'orniérage associés à l'endommagement par l'humidité ont été évalués à l'aide de différents orniéreaux et de l'essai de performance simple. Ces essais ont été menés à des températures comprises entre 40° et 64° C. Dans les essais de chaussée accélérés, l'orniérage du bitume-époxy polymérisé s'est avéré faible par rapport à celui des matériaux témoins.

Au vu des essais réalisés, les enrobés HRA et SMA époxy seraient considérés comme aptes à l'utilisation sur la plupart des sites subissant des contraintes importantes et nécessitant une résistance

très élevée à l'orniérage : tel est le cas par exemple, sur le réseau primaire britannique, des voies supportant au moins une charge d'au moins 135 millions d'essieux standard [essieu 80 kN] ou un TMJA de 80 000 (dans les deux sens), où le pourcentage de poids lourds est de 15 %. De même, l'enrobé BBSG époxy amine serait approprié pour la plupart des routes à fort trafic.

Concernant la résistance à l'orniérage, notamment si les températures sont élevées, le bitume-époxy devrait assurer une bonne qualité de service sur une longue période. Il est peu probable qu'il se dégrade ou qu'il se ramollisse sur le long terme. Il devrait permettre un revêtement à longue durée de vie, résistant à l'orniérage. Les essais de charge accélérés ont également souligné l'importance de la qualité de la couche de liaison ou de la couche de base bitumineuse au-dessous de la couche de surface à longue durée de vie (niveau de compactage, résistance à l'orniérage et durabilité générale). Le bitume-époxy n'est pas recommandé pour les chaussées autorisées aux véhicules équipés de pneus cloutés.

6.2.5 *Résistance au cisaillement de surface*

La résistance au cisaillement est importante pour tout matériau de construction, mais plus particulièrement sur une chaussée souple, qui doit assurer l'intégrité du matériau et des particules de granulats au sein de la matrice. Une perte de granulats par abrasion de surface due aux pneus des véhicules produit une surface rugueuse et irrégulière ; par ailleurs, les particules de granulats arrachées posent un problème de sécurité et peuvent réduire l'adhérence de la chaussée. Ce type d'endommagement est particulièrement courant pour les enrobés ouverts, car le pourcentage élevé de vides (environ 20 %) entraîne l'oxydation rapide du liant, par rapport aux enrobés fermés.

La résistance à l'abrasion de surface a été évaluée en laboratoire à l'aide de l'essai Cantabro, de l'essai au Triboroute (voir respectivement sections 4.6 et 4.8.1) et d'un essai de charge accéléré en vraie grandeur.

Les résultats des essais au Triboroute ont montré que dans des conditions de chargement reproduisant les forces de charges prévues des pneus de poids lourds, la perte de masse du bitume-époxy était très faible par rapport à celle des matériaux témoins (y compris d'un bitume modifié au polymère SBS).

Les résultats de l'essai Cantabro indiquent que les propriétés de cohésion du bitume-époxy au jeune âge (fraîchement polymérisé) devraient être comparables à celles de l'enrobé ouvert standard, à une température de 25° C. En revanche, elles sont nettement supérieures, à une température de 10° C. Les pertes de masse du bitume-époxy ne sont pas affectées par le traitement par oxydation, contrairement à celles du matériau témoin.

Les essais d'abrasion sévères, réalisés sur le matériau époxy, ont montré une bonne résistance au cisaillement et à la perte de granulats. Selon ces indicateurs, les performances du matériau sont adaptées à un revêtement à longue durée de vie, résistant à l'usure.

6.2.6 *Résistance à l'humidité*

La résistance à l'humidité et la durabilité sont étroitement associées en ce qui concerne les matériaux de chaussées bitumineux. La résistance à l'humidité est également liée au type de granulats utilisés. Il est donc essentiel que les matériaux subissent des essais de résistance à l'humidité, notamment si la durabilité est une question fondamentale.

Le degré d'orniérage mesuré à l'orniéreur a été négligeable ; l'endommagement par désenrobage dû à l'eau, selon ces essais, ont été considérés comme insignifiants. De même, les essais de type Lottman sur les matériaux HRA et SMA époxy fraîchement préparés (non polymérisés) et polymérisés ont indiqué que les matériaux époxy n'étaient pas sensibles à l'endommagement par l'humidité, même au jeune âge, c'est-à-dire avant la fin du processus chimique de durcissement, selon les critères du programme américain stratégique de recherche routière SHRP, équivalant à 80 % de la résistance à la traction retenue.

Bien que les résultats présentés n'aient indiqué aucune probabilité significative de sensibilité du bitume-époxy aux dommages dus à l'eau, il faut reconnaître qu'il n'existe aucune méthode d'évaluation universellement admise dans ce domaine. En particulier, notre compréhension des dommages dus à l'eau dans des situations réelles de circulation est médiocre. Il serait donc utile d'évaluer les performances d'un revêtement de bitume-époxy à une plus grande échelle, en soumettant une section d'essai inondée à des essais de chaussée accélérés.

6.2.7 Comportement à basse température

Un matériau de revêtement doit être performant à toutes les températures possibles. Un bon comportement à basse température est essentiel dans des régions comme le Canada ou les pays nordiques. Les bitumes traditionnels ont une tendance à la fissuration à basses températures, car ils se fragilisent et les forces de retrait augmentent. Les bitumes époxy sont thermodurcissables ; ils devraient donc présenter une rigidité plus élevée à basses températures que les bitumes traditionnels thermosensibles. Les essais de charge à basses températures qui ont été réalisés, certains à - 30° C, ont permis de vérifier les performances du bitume-époxy dans diverses conditions de température.

Les résultats des essais de retrait thermique empêché, réalisés sur un bitume-époxy dense polymérisé ont montré qu'en cas de refroidissement rapide, la température de rupture du matériau était de - 26° C, c'est-à-dire beaucoup plus basse que celle spécifiée dans les critères du liant Superpave. Les mesures de l'énergie de rupture et de la ténacité à la rupture à - 10° C et à - 30° C ont également montré que le bitume-époxy avait une résistance sensiblement plus élevée à l'amorçage de fissures et à la propagation de la rupture que les bitumes traditionnels. De même, les enrobés HRA et SMA époxy ont affiché de bonnes performances pendant les essais de flexion, à une température de 5° C.

Cependant, la ductilité et la flexibilité des matériaux époxy se sont avérées faibles par rapport à celles des matériaux témoins. Ce comportement est conforme aux caractéristiques de déformation élevées prédites par les mesures de fatigue réalisées sur les enrobés HRA et SMA époxy et pourrait justifier une limitation d'utilisation du bitume-époxy, dans la pratique. Des couches de fondation rigides pourraient être nécessaires pour réduire le niveau de déflexion (ou de déformation en traction) à l'intérieur du matériau.

Des essais de simulation sur structures bicouches (bitume-époxy sur couches de fondation de différentes rigidités) s'avèrent nécessaires, soit en laboratoire (par exemple, à l'aide d'un appareil de simulation de la fissuration thermique), soit dans une installation d'essais de chaussée accélérés, afin d'évaluer les performances probables à long terme de ces matériaux sur différents supports.

Il est clair que les bitumes époxy peuvent afficher de bonnes performances, même à basse température, et donc être résistants à la dégradation sur une large gamme de températures. La durabilité ne devrait pas être compromise par des changements thermiques ni affectée par un éventuel changement climatique.

6.2.8 Adhérence

Le maintien d'une adhérence adéquate est une propriété essentielle des chaussées, d'autant plus que l'amélioration de la sécurité des usagers reste le souci permanent de tous les maîtres d'ouvrage. L'adhérence des revêtements de bitume-époxy dépendra, en définitive, des propriétés des granulats utilisés, comme pour les bitumes traditionnels. Dans de nombreux cas, plus encore que les propriétés du bitume-époxy lui-même, l'adhérence peut être le facteur qui limitera la durée de vie du matériau. Des essais ont été réalisés pour mesurer l'adhérence et la perte de granulat dans différentes modalités, afin de vérifier si le maintien des granulats est amélioré par rapport aux matériaux traditionnels. Les sections soumises aux essais de chaussée accélérés ont montré que l'adhérence du bitume-époxy n'était pas sensiblement différente de celle d'un bitume traditionnel. Évidemment, l'adhérence d'un revêtement de bitume-époxy diminuera avec le temps et pourrait nécessiter une régénération pendant la vie structurelle de la couche de surface, comme c'est le cas pour les revêtements traditionnels (de référence).

6.2.9 Bruit

Les préoccupations concernant le bruit routier constituent une question importante dans de nombreux pays, notamment en Europe, où l'augmentation du trafic, de jour et de nuit, est devenue courante. Tous les matériaux de revêtements modernes doivent, si possible, être moins bruyants que les matériaux plus anciens. Le bruit dû au revêtement est lié spécifiquement à la taille du granulat et à la profondeur de texture, associés à l'uni de la couche supérieure de la chaussée. Les modalités de mise en œuvre et de compactage, ainsi que la consistance et la température du matériau complètent le profil acoustique du revêtement.

Les travaux réalisés ont indiqué que, pour satisfaire aux normes acoustiques tout en maintenant le coût initial, il serait souhaitable de donner la priorité au béton bitumineux drainant (BBDR).

Le revêtement traditionnel en BBDR est généralement choisi pour ses bonnes qualités de drainage de l'eau et pour sa capacité à réduire le bruit routier. Par comparaison avec ce BBDR à moindre coût, le BBDR avec liant bitume-époxy pourrait, selon les résultats des essais, améliorer la durée de vie et la durabilité de la chaussée. En revanche, rien ne prouve qu'il pourrait réduire le niveau sonore obtenu sur les chaussées en BBDR avec liant bitumineux.

6.2.10 Délamination

Étant donné que le projet d'un revêtement à longue durée de vie envisage une couche de matériau mince sur une structure de chaussée existante à longue durée de vie, il est essentiel d'examiner les possibilités de délamination du matériau. Une étude complète exigerait des essais en vraie grandeur ; quelques essais ont cependant pu être réalisés dans le cadre de cette étude.

Les essais limités réalisés ont été peu concluants, mais ont indiqué la nécessité d'une chaussée sous-jacente durable et d'une couche d'accrochage adéquate.

6.2.11 Durabilité

Bien que la durabilité à long terme du matériau ne puisse être entièrement testée que par des séries d'essais sur le long terme, l'ensemble des résultats des nombreux essais réalisés en laboratoire mettent

en évidence les performances à long terme exceptionnelles des bitumes époxy. Ils montrent que ce matériau résiste à de nombreuses formes de dégradation auxquelles les matériaux traditionnels sont soumis et est relativement inerte à l'oxydation et à la fragilisation, en particulier, donnée très significative au regard de la durabilité à long terme. Les essais d'abrasion ont également confirmé l'opinion selon laquelle la durabilité du matériau serait bonne, voire très bonne.

6.2.12 *Autres facteurs*

Les essais réalisés sur les bitumes époxy à base d'acide ont porté sur les propriétés connues pour être essentielles à une longue durée de service. Mais il existe d'autres facteurs importants pour certaines régions du monde. Dans des pays comme la Finlande, la Suède ou la Norvège, les automobilistes utilisent des pneus cloutés en hiver. Or, il est possible que les revêtements de bitume-époxy n'aient pas une longue durée de vie s'ils doivent supporter des véhicules équipés de pneus cloutés. Par ailleurs, d'autres essais pourraient être nécessaires pour vérifier que l'utilisation de fondants chimiques ne risque pas de compromettre la longévité de ces revêtements.

6.2.13 *Conclusions sur le bitume-époxy*

Il ressort que le bitume-époxy permet d'obtenir des enrobés bitumineux aux performances nettement supérieures par rapport aux enrobés traditionnels. 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.
- Sensiblement plus résistants à l'amorçage et à la propagation de fissures à basse température.
- Sensiblement plus résistants à l'abrasion de surface due aux pneus, même après oxydation.
- Sensiblement 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.

Bien que la polymérisation des systèmes époxy à base d'acide soit lente (plusieurs semaines ou mois) à température ambiante, le comportement des bitumes époxy non polymérisés a été, dans tous les cas, au moins comparable ou supérieur à celui des matériaux témoins. Le processus de polymérisation ne devrait donc pas affecter la durée de vie du matériau (à l'exception de la lenteur pour développer une résistance précoce à l'orniérage, qui pourrait entraîner un léger orniérage au jeune âge, sauf si les durées de polymérisation sont modifiées).

Presque tous les essais ont indiqué que le bitume-époxy acide devrait donner un matériau 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. Il a été démontré que si tous les aspects du processus sont bien maîtrisés, le bitume-époxy devrait donner un matériau de revêtement d'une durée de vie nettement plus longue que les autres matériaux utilisés actuellement.

6.3 Enduit hydraulique fibré gravillonné

6.3.1 Généralités

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 couche de roulement 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.

Comme tous les matériaux de chaussées, l'EHFG doit résister à la charge de trafic et aux contraintes environnementales. En raison de sa nature et de son épaisseur de mise en œuvre ultra-mince, il existe d'autres domaines dans lesquels la couche d'EHFG doit être suffisamment résistante pour pouvoir servir de revêtement avancé.

En matière de conception d'une couche de roulement, une des conditions les plus importantes est l'adhérence avec les pneumatiques, qui dépend des granulats enchâssés dans le revêtement. Une autre exigence porte sur le liant dont la principale fonction est d'assurer l'adhésion des granulats à la chaussée. Une bonne liaison est également essentielle entre le mortier de ciment et le support bitumineux.

Sur une mince couche de surface en béton, 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 s'assurer que l'ouverture des fissures reste invisible, un renforcement est nécessaire. La couche de mortier étant mince, les recherches ont indiqué que seules des fibres d'acier ajoutées au mélange pourraient répondre à ce besoin.

Les essais ont eu pour objectif de réaliser une analyse essentiellement en laboratoire afin de faciliter une évaluation et une extrapolation des résultats, portant sur la faisabilité d'une couche de roulement ultra-mince en EHFG aux propriétés de longévité. Les essais ont donc été axés 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 superficielles, bruit et adhérence.

Comme indiqué au chapitre 5, l'ensemble des essais réalisés sur le matériau ont donné de bonnes indications de performance au regard des propriétés requises pour un revêtement avancé et ont

également mis en évidence les domaines dans lesquels les méthodes de construction doivent être perfectionnées pour garantir des performances satisfaisantes.

6.3.2 Fissuration par retrait et délamination

L'EHLFG est un matériau hydraulique, rigide par nature, et doit être mis en œuvre en couche ultra-mince, telle un tapis. Il peut donc être sensible au retrait et à la fissuration, ainsi qu'à la délamination due au support existant. Des essais visant à réduire ces effets se sont avérés essentiels pour garantir les performances, ainsi que pour étudier la formulation et le type de fibres à incorporer dans le mélange. Étant donné que le béton et le bitume sous-jacent se comportent de manière différente, il est très important que l'EHLFG soit suffisamment résistant, solide et « collant » pour supporter les effets du retrait et de la délamination. Les séries d'essais décrites au chapitre 5 ont permis de déterminer les proportions du mélange, afin de réduire ces problèmes au minimum.

Les premiers essais en extérieur (sans charge de trafic) d'un mortier brut mis en œuvre sur des surfaces de bitume non traitées, n'ont pas été satisfaisants en raison d'une fissuration par retrait excessive et d'un décollement du support. D'autres échantillons ont été coulés et un certain nombre de bandes comprenant 1 %, 2 % et 3 % de fibres d'acier et de PVA ont été observées en extérieur. Les meilleures performances ont été constatées sur les bandes comprenant 3 % de fibres d'acier, avec une très légère fissuration par retrait. Toutes les autres bandes ont subi une fissuration et une délamination plus ou moins sévères.

Pour éliminer ces problèmes initiaux, une série ultérieure d'essais de fissuration a permis d'améliorer la liaison entre le support bitumineux et le mortier, en réduisant le seuil de contrainte du mortier et en améliorant la texture de surface du bitume. De nouvelles bandes comprenant 3 % de fibres d'acier, ainsi que 3 %, 4 % et 5 % de fibres de PVA ont été mises en œuvre et observées. Après 42 jours, seule la bande comprenant 3 % de fibres de PVA a développé deux fissures fines, alors que les autres bandes n'ont développé aucune fissure ni délamination. Des observations ultérieures ont montré que toutes les bandes composées de fibres de PVA avaient développé des fissures, tandis que la bande comprenant 3 % de fibres d'acier était encore en parfait état. À ce stade avancé de l'étude, il a donc été décidé qu'un matériau de matrice comprenant 3 % de fibres d'acier devrait être recommandé pour les essais ultérieurs.

Pour compléter les essais en extérieur, il a été décidé d'évaluer la formation de fissures dans des conditions contrôlées en laboratoire, en testant deux matériaux de matrice, ainsi que différents types de fibres et teneurs sur des bancs de fissuration (voir section 5.8). Ces essais relativement sévères ont été réalisés sans le support que la couche de base devrait normalement assurer. Les meilleures performances ont été obtenues avec le matériau de matrice standard et un minimum de 3 % de fibres d'acier ou de 6 % de fibres de PVA.

Les performances de l'EHLFG dans un climat aux températures estivales élevées ont été étudiées grâce à la construction d'une piste d'essai en Nouvelle-Galles du Sud (Australie). Une section non circulée, d'une longueur de 20 m, a été revêtue d'une matrice comprenant 4 % de fibres de PVA. Les observations ont commencé pendant l'hiver australien. Lors de cette série d'essais, la profondeur de texture du support n'a été que d'environ 1 mm, soit sensiblement moins que les 2 mm exigés. Pendant les quatre premières semaines, quelques fissures transversales sont apparues sur la couche de roulement en EHLFG.

En résumé, il est essentiel que l'EHLFG puisse résister à la fissuration et à la délamination, s'il doit être utilisé pour un revêtement avancé. Il a été démontré qu'avec la bonne formulation et les fibres les

plus appropriées, la fissuration et la délamination pourraient être maintenues à un niveau acceptable. Bien que pour l'instant, des essais sur plusieurs années n'aient pas été effectués parallèlement pour reproduire les effets du trafic, les faits et les performances indiquent que l'EHFG peut résister à la fissuration et à la délamination sur le long terme.

6.3.3 *Résistance à l'usure de surface*

La surface de l'EHFG est incrustée de gravillons lui assurant l'adhérence nécessaire pour un revêtement soumis au trafic. Il est donc capital que le matériau maintienne les gravillons en place et ne perde pas son intégrité par l'usure due aux pneus ou en raison des conditions atmosphériques. La résistance à l'usure de surface et la sensibilité à la perte de gravillons de l'EHFG ont été évaluées par différents essais, réalisés dans les laboratoires de différents pays et sur les éprouvettes préparées par différents organismes.

La perte de gravillons s'est avérée plus élevée que pour un enduit en bitume-époxy et un revêtement bitumineux mince standard. Toutefois, la quantité de gravillons nécessaire par mètre carré de revêtement a été réduite depuis les essais initiaux.

Comme pour le revêtement de bitume-époxy, le revêtement d'enduit hydraulique fibré gravillonné a été soumis à l'essai au Triboroute, afin d'évaluer sa résistance au cisaillement de surface. Après 3 000 cycles de chargement, environ 9 % des gravillons étaient arrachés ; après 3 000 autres cycles, un total d'environ 10 % étaient arrachés. Ces résultats indiquent que les gravillons qui adhèrent moins fortement sont rejetés dès le début, mais qu'ensuite la perte de gravillons se stabilise et que la majorité des gravillons resteront en place sur la durée de vie totale de la chaussée. La comparaison des pertes de masse du revêtement d'EHFG et des enduits réalisés avec d'autres liants montre que le revêtement d'enduit hydraulique fibré gravillonné est beaucoup plus performant qu'un enduit au bitume modifié, mais pas autant qu'un enduit au bitume-époxy.

En ce qui concerne la longévité, l'enchâssement des gravillons et le maintien des caractéristiques de surface sont essentiels pour que l'EHFG puisse être classé dans les revêtements avancés. L'adhérence sera assurée si les gravillons ne sont pas usés ni arrachés de la matrice de béton. Les essais sur plusieurs années n'ont pas encore été possibles, mais les premières indications laissent penser qu'un enchâssement de longue durée est réalisable. La perte de granulats s'est avérée moins élevée que pour les matériaux de référence, avec un très bon maintien en place des gravillons. Quelques modifications de la formulation pourraient être nécessaires pour assurer les performances élevées d'un revêtement avancé. Les effets de l'usure sur la matrice de béton réelle ont été réduits, grâce à l'intégrité du matériau.

6.3.4 *Résistance au flambement*

Comme évoqué au chapitre 5, l'EHFG pourrait être, en raison de sa nature, particulièrement sensible aux sollicitations thermiques. Sa résistance au flambement (ainsi qu'à la fissuration) sera donc une propriété essentielle. Elle sera assurée par l'intégrité du matériau et l'effet des fibres incorporées au mélange. Bien que le phénomène ait été testé dans le cadre des essais de fissuration, le calcul de la dilatation thermique probable de l'EHFG pendant un été extrêmement chaud (55° C) indique que le flambement et la délamination sont improbables sous les climats tempérés. La dilatation du matériau est compensée par le retrait qui se produit pendant la cure.

Bien qu'aucun essai à long terme n'ait été effectué, les essais réalisés indiquent que l'EHLFG devrait résister aux sollicitations thermiques et ne pas se dégrader pendant une période extrêmement longue.

6.3.5 Résistance à la fatigue

Comme l'étude du bitume-époxy l'a mis en évidence, les charges que subissent les chaussées sont principalement dues au nombre extrêmement élevé de charges répétées du trafic. La dégradation causée par une faible résistance à la fatigue est une préoccupation majeure dans l'étude des nouveaux matériaux de chaussées. Des essais comprenant plus de 25 millions de cycles de déformation, sur les mortiers en EHLFG renforcés de fibres d'acier et de PVA, ont montré que la déflexion appliquée était environ trois fois supérieure à la valeur moyenne attendue sur des routes de cette catégorie. Ils ont indiqué que les deux types d'EHLFG fibrés offraient une résistance à la fatigue très élevée. Après la formation initiale de microfissures pendant les quelques premiers milliers de chargements, aucune réduction supplémentaire du module d'élasticité ne devrait se produire pendant la durée de service d'une couche de roulement en EHLFG. Il ressort des essais effectués que l'EHLFG a une bonne résistance à la fatigue ; bien qu'il se produise une fissuration initiale, d'ailleurs minimale, aucune dégradation ultérieure n'est constatée. Cette observation confirme la capacité du matériau à assurer une bonne qualité de service en tant que revêtement avancé, à longue durée de vie.

6.3.6 Résistance au gel-dégel

Comme pour les autres aspects liés aux sollicitations thermiques, il est important de vérifier que le matériau de chaussée peut résister aux changements de température susceptibles de se produire sur de courtes périodes. Des essais ont été réalisés, comme indiqué au chapitre 5, en intégrant des changements de température aux séquences de chargement. Les cycles de gel-dégel (- 20° C à 20° C) appliqués au EHLFG coulé sur des éprouvettes bitumineuses ont montré que la délamination ou l'écaillage du matériau du support en conditions hivernales ne devraient pas être importants dans la pratique. De même, les pertes de gravillons de bauxite à la surface des éprouvettes ont été négligeables, même après 112 cycles de gel-dégel, et ne devraient pas poser de problèmes significatifs sur le terrain. Les essais indiquent que l'EHLFG devrait résister aux changements de température, conserver son intégrité et rester parfaitement utilisable.

6.3.7 Bruit

Les préoccupations concernant le bruit sont particulièrement pertinentes pour l'EHLFG, dans lequel l'enchâssement détermine la surface et la taille des gravillons. La texture et l'uni de surface doivent donc être particulièrement adaptés, afin de réduire les émissions acoustiques autant que possible. Ces dernières ont été évaluées par des calculs de modélisation à partir des mesures de la texture de surface effectuées sur l'une des bandes mises en œuvre au LCPC. Les travaux réalisés semblent indiquer qu'avec un bon enchâssement des gravillons et la profondeur de texture la plus appropriée, les émissions acoustiques ne seront pas différentes de celles que produisent les revêtements traditionnels actuels. Cette théorie n'a pas encore été entièrement éprouvée, mais de précédents travaux sur des revêtements de béton à granulats apparents ont indiqué qu'il était possible d'obtenir des niveaux acoustiques acceptables, en apportant le soin et l'attention nécessaires. D'autres études ont montré que la profondeur de texture et les gravillons pouvaient être maintenus sur le long terme ; il est donc improbable que les émissions acoustiques augmentent sur une longue période.

6.3.8 *Résistance aux sollicitations climatiques et mécaniques*

La résistance aux effets environnementaux est une propriété essentielle de tout matériau de chaussée. Bien qu'il soit difficile de la tester entièrement en laboratoire, des essais ont été réalisés sur l'EHLFG d'une manière extrêmement rigoureuse. Les effets combinés des sollicitations mécaniques, climatiques et chimiques ont été testés au moyen d'un essai intégralement réalisé en laboratoire, comprenant des cycles d'impacts de billes répétés sur la couche de surface, des cycles de gel-dégel avec une solution de NaCl et enfin, une immersion dans un pH faible. Différentes caractéristiques de surface comme la perte de gravillons, l'adhérence et la profondeur de texture, ont été mesurées pendant et après ces essais.

La perte totale de gravillons pendant ces essais sévères s'est élevée à environ 20 %. En revanche, l'adhérence et la profondeur de texture, en termes pratiques, n'ont pas été modifiées. Bien qu'une perte de gravillons ait donc été enregistrée sous ce régime d'essais très abrasifs, d'autres propriétés sont restées inchangées. On estime en conséquence que le matériau offre une très bonne résistance aux effets environnementaux. Ces essais n'ont pas été réalisés en vraie grandeur ni en conditions réelles de trafic ; cependant, en raison de sa sévérité, ils permettent de conclure que le matériau survivra très probablement à d'importantes perturbations climatiques sur une longue période.

6.3.9 *Effets du trafic*

Le revêtement d'EHLFG est par nature résistant à l'orniérage, mais cette mince couche doit également offrir une résistance à la tendance à l'orniérage du bitume sous-jacent, à températures élevées.

La résistance à l'orniérage de l'Enduit hydraulique fibré gravillonné a été évaluée et comparée à celle du bitume-époxy et d'un matériau de référence dans une installation d'essais de chaussée. Pendant l'application d'une charge de 1 million d'essieux standard, l'orniérage est resté négligeable et s'est élevé seulement à environ la moitié de l'orniérage du bitume-époxy. Après une charge supplémentaire de 500 000 essieux standard à une température élevée de 35° C, l'orniérage était toujours négligeable et bien inférieur à celui du bitume-époxy et du matériau de référence. Les mesures de frottement effectuées dans l'installation indiquent que l'adhérence a légèrement baissé sous l'effet du trafic, mais est restée très élevée, grâce aux bonnes propriétés de frottement des gravillons de bauxite. Bien qu'il se soit produit une fissuration aléatoire dans l'EHLFG, toutes les fissures ont été classées parmi les fissures fines ou de l'épaisseur d'un cheveu, d'une ouverture inférieure à 0.5 mm, et sont restées étroitement fermées grâce aux fibres, jusqu'à la fin des essais.

Le principal problème observé dans l'installation d'essais de chaussée a été un déplacement ascendant (tuilage) de la couche de roulement en EHLFG, le long des bords de la dalle. Il semble dû à la température élevée (35° C). En effet, aucun problème ne s'est produit lors des essais à 25° C. Ce résultat indique la nécessité de mettre en œuvre la couche de roulement en EHLFG sur un support de bonne qualité.

Il a été démontré que l'EHLFG présenterait un orniérage minimal, mais dépendant entièrement de la nature du matériau sur lequel la couche serait mise en œuvre. Tous les travaux actuels sur un revêtement à longue durée de vie s'appuient sur le principe que le matériau de la couche inférieure doit avoir une structure solide, à longue durée de vie, capable de résister à l'orniérage et autres formes de dégradation. Les préoccupations soulevées par les essais mentionnés plus haut seront résolues si l'EHLFG est mis en œuvre dans toute sa largeur sur un support solide et durable. Dans ce cas, tout indique qu'il devrait résister aux effets du trafic, sur une durée extrêmement longue.

6.3.10 *Autres facteurs*

Les essais réalisés sur l'EHLFG ont porté sur les propriétés connues pour être essentielles à une longue durée de service. Mais il existe d'autres facteurs importants pour certaines régions du monde. Dans des pays comme la Finlande, la Suède ou la Norvège, par exemple, les automobilistes utilisent des pneus cloutés en hiver. Or, il est possible que ces pneus ne soient pas compatibles avec les revêtements d'EHLFG. Par ailleurs, d'autres essais pourraient être nécessaires pour vérifier que l'utilisation de fondants chimiques ne risque pas de compromettre la longévité de ces revêtements.

6.3.11 *Conclusions sur l'enduit hydraulique fibré gravillonné*

Contrairement au bitume-époxy dont les propriétés techniques peuvent être facilement comparées à celles d'un bitume de référence, l'enduit hydraulique fibré gravillonné est d'une conception nouvelle, ne disposant d'aucun matériau de référence évident. Il peut être décrit comme une tentative d'introduction d'un liant hydraulique durable et rigide dans un enduit traditionnel, en remplacement du bitume. L'évaluation de cette couche de roulement doit donc être davantage axée sur les résultats d'essais réels.

De manière générale, l'épaisseur de la couche de mortier fibré a dû être réduite au minimum pour des raisons de coût. En même temps, elle devait être suffisante pour permettre une bonne pénétration des gravillons dans le mortier frais, où la présence des fibres provoque une réaction élastique, réduisant souvent le contact direct des gravillons avec la couche de base. Par ailleurs, le composite gravillons-mortier devait former une couche de surface solide, protégeant les couches de chaussée inférieures.

La couche de roulement en EHLFG devait également rester intacte, sans fissuration discrète ni délamination, tout en conservant ses propriétés fonctionnelles exceptionnelles sur une durée de 30 ans. Grâce au choix de gravillons de bauxite, extrêmement durables et résistants à l'usure, la texture et le frottement ne devraient pas poser de problèmes, à condition que les gravillons restent en place.

Compte tenu de la nature du matériau et de la mise en œuvre en couche mince, les essais ont été particulièrement axés sur les effets thermiques, ainsi que sur la capacité du matériau à rester fixé au support et à maintenir les gravillons en place, pour assurer les propriétés essentielles d'adhérence et de roulement.

Les résultats suggèrent que les gravillons bien enchâssés (probablement sur une hauteur de 1/2 à 2/3) ne seront pas rejetés, mais parmi ceux qui adhèrent le moins fortement, certains pourraient être arrachés en début de service. Avec une méthode de mise en œuvre des gravillons et une procédure de cure appropriées, le maintien des gravillons en place pourrait s'élever à 80 %-90 % de la masse totale, ce qui devrait être suffisant pour préserver l'adhérence de la chaussée.

La durabilité et la résistance à la fatigue du matériau de la matrice semblent très élevées. Avec l'ajout de fibres d'acier, il pourrait se produire une légère corrosion superficielle, qui ne devrait toutefois pas avoir d'effet sur les performances à long terme.

Le revêtement d'EHLFG suscite encore deux principales préoccupations :

- Premièrement, une tendance à la délamination pourrait apparaître le long des bords. À températures élevées, la résistance à la traction du support bitumineux pourrait être insuffisante pour maintenir en place la couche de roulement très rigide. Telles sont les conclusions formulées après le passage dans l'installation d'essais de chaussée. Il sera donc

nécessaire de spécifier un matériau pour couche de base bitumineuse possédant une résistance à l'orniérage appropriée et une sensibilité thermique limitée.

- Deuxièmement, des essais à plus grande échelle doivent être réalisés pour confirmer qu'un mélange renforcé de 3 % de fibres d'acier supprime bien la fissuration transversale discrète.

Si l'un de ces deux modes de rupture possibles se produit, ce sera probablement en début de vie de la couche de roulement.

En résumé, les essais ont montré que l'EHFG avait une résistance et une intégrité élevées. Lorsqu'ils ont indiqué des performances réduites, les raisons ont été recherchées et des améliorations ont été proposées. Il est clair que certaines conditions doivent être assurées, notamment la présence d'une couche inférieure (couche de base) solide et le bon encaissement des gravillons, pour obtenir des performances optimales. Le déroulement des essais, ainsi que l'examen des résultats et des performances permettent de conclure que si la couche d'EHFG 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.

7. RECHERCHES ET ESSAIS ULTÉRIEURS

7.1 Introduction

De nombreux efforts ont été effectués pendant la deuxième phase du projet pour étudier les propriétés des deux matériaux candidats, en exploitant au maximum les essais réalisés dans les laboratoires nationaux participants. Des connaissances importantes ont été réunies, mais les recherches ont également révélé quelques nouvelles facettes à évaluer, ainsi que certains aspects et domaines à examiner plus en détail.

Ce chapitre met en évidence un certain nombre d'aspects et de questions qui exigeront des recherches et des essais complémentaires. Ils sont présentés dans les trois grandes sections suivantes :

- questions communes aux deux matériaux ;
- questions spécifiques au bitume-époxy ;
- questions spécifiques à l'enduit hydraulique fibré gravillonné.

De manière générale, compte tenu des travaux réalisés (décrits aux chapitres 4 et 5), ainsi que des évaluations des matériaux et des caractéristiques de performances (présentées au chapitre 6), il est clair que le bitume-époxy sera plus rapidement prêt pour les projets de démonstration prévus en phase III que l'enduit hydraulique fibré gravillonné.

Premièrement, il existe une différence dans la disponibilité de l'équipement de fabrication et de mise en œuvre. Alors que l'équipement existant peut servir aux applications du bitume-époxy sans subir de modifications majeures, il n'est pas adapté aux applications commerciales de l'Enduit hydraulique fibré gravillonné et devra faire l'objet d'un développement qui prendra un certain temps. Cet aspect est abordé plus en détail au chapitre 9.

Deuxièmement, le bitume-époxy ne fait que remplacer un liant par un autre, tandis que la formulation d'enduit hydraulique fibré gravillonné la plus appropriée nécessite encore des travaux de recherche et de développement.

Enfin, les deux matériaux sont prévus pour une utilisation en couche de surface mince, ce qui exige une connaissance particulière et une sensibilisation de toutes les parties impliquées dans le dimensionnement et la construction de chaussées.

7.2 Questions communes aux deux matériaux

7.2.1 *Essais de charge accélérés*

D'autres essais de charge accélérés sont nécessaires pour les deux matériaux. Certains ont été entrepris, notamment dans l'installation d'essais de chaussée du TRL, au Royaume-Uni (voir 4.7.1),

dans l'installation sous abri d'essais de chaussée accélérés de Canterbury, en Nouvelle-Zélande (voir 4.7.2) et à l'ornièreur d'enrobés bitumineux de la Vejdirektoratet (VD), au Danemark (voir 4.7.3). D'autres sont prévus ou en cours de réalisation, par exemple dans l'installation de chargement accéléré de la FHWA, aux États-Unis (voir 4.7).

Cependant, pour renforcer la confiance dans les performances et la longévité des solutions en enduit hydraulique fibré gravillonné et en bitume-époxy, dont les sections sont très minces par rapport aux charges qu'elles devront supporter, l'interaction avec le support ou la couche sous-jacente est très importante et nécessite des recherches complémentaires.

Les questions qui doivent être étudiées sont notamment les suivantes :

- Les revêtements minces exigeront-ils des couches de chaussée sous-jacentes particulières ou coûteuses pour assurer une bonne liaison sous l'effet du trafic et de la température ?
- Une préparation particulière sera-t-elle nécessaire avant la mise en œuvre de la couche de surface à longue durée de vie pour obtenir une chaussée optimale ?
- Quelle résistance, quelle durabilité et quelle qualité devront avoir les couches sous-jacentes pour assurer une base appropriée au revêtement avancé ?

Ces questions ont été soulevées lors de consultations auprès des industriels, au Danemark, en 2006. Les informations disponibles sur ces aspects étaient relativement limitées, même après les essais réalisés aux laboratoires TRL et VD, et continueront de l'être jusqu'à ce que ces points soient plus amplement étudiés.

7.2.2 *Propriétés des granulats*

Le bitume-époxy et l'enduit hydraulique fibré gravillonné seront exposés pendant de longues périodes à l'action de polissage exercée par les pneus sur les granulats. Il est particulièrement important de prendre en compte l'effet du polissage lors de la sélection des granulats (artificiels ou naturels) à incorporer dans le bitume-époxy, ainsi que l'indice de frottement lors de la sélection des granulats à incorporer dans l'enduit hydraulique fibré gravillonné. Le choix du granulat est donc déterminant pour la longévité des chaussées réalisées avec ces matériaux.

L'EHFG présente l'avantage que les particules de granulats spécialement sélectionnées peuvent être partiellement enchâssées dans un revêtement mince pour assurer une bonne adhérence de la chaussée. Étant donné qu'une seule couche de granulats sera nécessaire pour la couche de roulement en EHFG, le volume de granulats sera réduit. Il sera donc plus facile de prendre en charge le coût d'un granulat de très grande qualité. Un granulat artificiel comme la bauxite représenterait une solution plus coûteuse pour le bitume-époxy.

Bien sûr, pour les premiers projets de démonstration envisagés en phase III, des granulats autres que la bauxite pourront être utilisés. En effet, le principal objectif ne sera pas de montrer les effets à long terme, mais la matrice du matériau, ainsi que les solutions proposées en matière de production et de contrôle qualité.

Les produits finaux entièrement développés, quels que soient les granulats, artificiels ou de source naturelle et locale, devront résister pendant quelques 30 ans ou plus aux dommages causés par le trafic

et le climat qui, s'ils n'ont pas été traités de manière appropriée, auront des effets sévères et inacceptables sur la sécurité routière.

Dans le cas où aucun granulats naturels ne pourrait résister pendant une si longue durée de service sans subir de polissage, une autre stratégie à étudier serait d'envisager une remise en état de la microtexture au bout de 10 à 20 ans. Celle-ci pourrait être réalisée par grenailage, projection d'eau ou autre procédé similaire visant à rétablir l'adhérence en améliorant la texture (macro et micro) du granulats. Toutefois, les coûts et impacts éventuels de ces travaux de régénération sur les conditions initiales de viabilité économique de la couche de roulement à longue durée de vie devront être déterminés et évalués.

Un autre domaine de recherche est la possibilité de recyclage du bitume-époxy et de l'enduit hydraulique fibré gravillonné.

7.3 Bitume-époxy

7.3.1 *Optimisation de la vitesse de polymérisation et de la durée d'utilisation*

La principale différence dans la fabrication et la mise en oeuvre du bitume-époxy par rapport au bitume traditionnel est que la procédure de production (malaxage, transport, mise en oeuvre et compactage) doit être adaptée aux caractéristiques de prise du liant époxy. 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.

La solution comprendra l'optimisation de la composition chimique afin que ces exigences puissent être satisfaites. Il est évidemment important d'obtenir la formulation appropriée. Le fabricant de bitume devra être bien informé et sensibilisé aux questions essentielles. En cas de perturbations dans la centrale d'enrobage au cours de la fabrication, le matériau pourrait s'avérer inutilisable si, en conséquence, la durée de mise en oeuvre ne peut pas être respectée. Le risque de défauts de construction et d'endommagement de la centrale est plus élevé qu'avec un bitume traditionnel.

Compte tenu de l'importance déterminante du respect des durées, une planification et une gestion rigoureuses des processus en aval devront être réalisées, en prenant notamment les mesures suivantes :

- Faire en sorte que le transport entre la centrale d'enrobage et le chantier soit le plus court possible et réduire le risque de retards liés aux embouteillages.
- S'assurer, en cas de mise en oeuvre sur site, que les volumes fournis correspondent aux quantités d'enrobé qui peuvent être traitées en même temps.
- Garantir, de manière générale, que le processus de construction sera continu, sans interruptions ni perturbations.

Les procédures de construction doivent être adaptées à la durée de polymérisation de l'époxy, après la mise en oeuvre, et au temps disponible pour le compactage de l'enrobé ; il est donc important d'étudier suffisamment cet aspect au cours des essais, avant l'utilisation du bitume-époxy pour une application réelle. Le délai de réouverture de la route à la circulation ne peut être établi avec certitude qu'après cette opération.

7.3.2 *Polymérisation à basse température et conservation de l'énergie*

Les systèmes époxy à prise rapide ont montré leur capacité à se polymériser, à basse température, plus rapidement que prévu. Ils ouvrent des perspectives de réduction des coûts d'énergie, s'ils peuvent être traités à basses températures. En fait, les systèmes époxy devraient permettre, de manière générale, une conservation de l'énergie au moins comparable aux enrobés à chaud actuels.

7.3.3 *Modélisation approfondie du bitume-époxy*

Malgré les avancées récentes des sciences et techniques informatiques, la simulation du comportement d'une chaussée reste un des problèmes les plus complexes en génie civil. Les difficultés sont doubles. Premièrement, il faut améliorer la caractérisation mécaniste du comportement des nouveaux matériaux pour couches de roulement. Deuxièmement, il faut développer des modèles pouvant gérer les réactions du matériau en fonction du temps, ainsi que les aspects physiques liés à la charge de trafic.

Tout nouveau matériau doit faire l'objet d'une recherche appropriée sur son comportement à long terme. L'application des méthodes disponibles sur des périodes très longues est essentielle pour formuler des prédictions sur la durée de vie des couches de roulement construites avec de nouveaux matériaux. Dans le cas présent, les chercheurs peuvent adopter utilement de nouvelles approches sur la probabilité et tirer parti des connaissances sur les autres matériaux pour définir le comportement probable du bitume-époxy sur le long terme.

Généralement, les modèles intègrent les effets à long terme des phénomènes de vieillissement et des conditions environnementales variables, notamment l'association des changements climatiques et de la charge de trafic. Les bitumes époxy nécessitent des modèles pouvant également gérer les nombreux processus physiques intéressants qui se produisent sur des périodes relativement courtes et étudier leurs conséquences sur le comportement à long terme de la chaussée. La compréhension de ces relations est actuellement inadéquate.

La modélisation du comportement du matériau afin de saisir les phénomènes de vieillissement et l'influence des conditions environnementales et climatiques est importante, mais soulèvera de nouvelles difficultés.

7.3.4 *Impacts environnementaux*

7.3.4.1 *Évaluation chimique et environnementale des types d'époxy*

Les différents systèmes époxy peuvent avoir différents impacts environnementaux. La fabrication et le transport des composants non polymérisés exigent un soin particulier. En général, les questions de sécurité et de santé disparaissent dès lors que le système est réticulé.

L'expérience acquise avec les applications sur tabliers de ponts indique que la principale période suscitant des préoccupations pour la sécurité des opérateurs se situe pendant les travaux à la centrale d'enrobage. Néanmoins, des études de lixiviation doivent être menées pour vérifier que le matériau ne présente aucun danger pour l'environnement.

Pendant le malaxage et le conditionnement à la centrale d'enrobage, les composants réactifs doivent être manipulés par un personnel formé et compétent. Au cours du transport sur le chantier, le

malaxage, la mise en œuvre et le compactage, les opérateurs immédiatement concernés doivent utiliser une protection adéquate pour leur santé et leur sécurité. Des précautions et une sensibilisation sont nécessaires jusqu'à ce que la réaction du matériau soit terminée.

Il est important de comprendre et d'accepter ces effets, notamment de la part des autorités chargées de la santé et de la sécurité au travail, ainsi que de l'environnement, avant que ces matériaux de revêtements innovants soient utilisés à grande échelle. Ces questions sont abordées plus en détail au chapitre 8.

7.3.4.2 Possibilité de recyclage

Si le bitume-époxy est utilisé pour les couches de roulement de chaussées à longue durée de vie, il convient d'étudier les différentes options à la fin de la durée de service et les possibilités de recyclage. Il est techniquement possible de recycler le bitume-époxy comme un « granulat ».

Il sera néanmoins nécessaire d'évaluer s'il est possible de recycler le matériau bitumineux, avec ajout de liant traditionnel ou du nouveau liant époxy, à chaud ou à froid, en tenant compte des questions d'environnement, ainsi que de sécurité et de santé. Au pire, ce qui est assez improbable, le matériau pourrait servir de « filler liquéfiable ».

Si le recyclage est interdit par une autorité, une méthode de détection sera nécessaire pour rechercher la présence de bitume-époxy. Bien sûr, cette décision influera sur les coûts, si ces évaluations obligent les fabricants de bitume à une analyse de la teneur en époxy du matériau bitumineux récupéré, en plus des autres essais.

7.4 Enduit hydraulique fibré gravillonné

L'EHLFG est un produit innovant, développé et testé pour la première fois dans des applications de revêtements routiers, au cours du présent projet. Il est clair que certaines exigences restent à satisfaire (en particulier, couche inférieure suffisamment rigide, 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.

7.4.1 Spécifications pour la couche de base bitumineuse

Les essais de charge accélérés et en vraie grandeur ont montré que le support devait être rigide et assez solide pour résister aux contraintes verticales induites par le retrait de l'EHLFG (afin d'éviter un phénomène de « tuilage ») et, plus important encore, aux contraintes induites par le moment fléchissant accompagnant l'orniérage de la couche bitumineuse inférieure.

Une résistance minimale à la traction sous des températures allant jusqu'à 40° C et un niveau d'orniérage maximal acceptable doivent être spécifiés pour le matériau bitumineux et respectés sur le chantier, y compris aux bords des chaussées routières.

7.4.2 *Effet du dosage en eau sur les propriétés de l'enduit hydraulique fibré gravillonné*

Le mortier d'EHFG initialement proposé dans ce projet avait un rapport eau/ciment (Portland) de 0.20-0.21. Cependant, en raison des difficultés de malaxage et de mise en œuvre du produit en laboratoire, ce rapport a été augmenté à 0.24-0.27 pendant certaines tâches.

À l'avenir, il sera important de connaître l'effet du dosage en eau sur les principales propriétés techniques du mortier, à savoir :

- La facilité de malaxage (à l'échelle industrielle).
- La maniabilité (juste après le malaxage) et son évolution.
- « L'extrudabilité » (voir section suivante).
- Le retrait.
- La perte de gravillons.
- La liaison avec l'enrobé bitumineux.

Les connaissances acquises sur ces propriétés permettront de définir des valeurs acceptables pour le rapport eau/ciment (e/c), au regard du contrôle qualité sur site.

7.4.3 *Technique d'application industrielle*

Pendant les travaux de phase II, toutes les recherches sur l'EHFG ont été réalisées sur des sections mises en œuvre manuellement. Pour de futures applications industrielles et commerciales, un matériel devra être développé pour la mise en œuvre de couches de roulement en EHFG sur des chaussées routières existantes.

Ce matériel d'EHFG devra exécuter successivement quatre fonctions différentes (en un seul passage) :

- a) Répandre la couche de mortier selon une épaisseur imposée (soit 8 ± 2 mm).
- b) Répartir uniformément les gravillons à une densité imposée (soit 4.0 ± 0.5 kg/m²), quelle que soit la vitesse de l'engin.
- c) Compacter les gravillons à une hauteur imposée, pour obtenir une surface plane et unie, afin d'assurer la macrotecture spécifiée (soit 1.2 ± 0.2 mm).
- d) Appliquer un produit de cure à une densité imposée (selon le produit).

Certains engins de chantier actuels sont capables de réaliser une partie de ce processus :

- Machines à coffrage glissant traditionnelles, utilisées actuellement pour construire les chaussées en béton.
- Finisseurs pour enrobés coulés à froid, utilisés actuellement pour répandre de très minces couches de matériau d'une consistance comparable à celle du mortier d'EHFG.

- Engins de mise en œuvre d'enduits, utilisés actuellement pour pulvériser une émulsion de bitume et épandre un lit de particules de granulats.

Il devrait donc être possible de développer un finisseur d'EHFG en adaptant et en associant ces engins existants.

7.4.4 Tendances à la fissuration en deux dimensions

L'essai de fissuration réalisé au LCPC a été concluant. Mais s'agissant d'un essai à une dimension sur bandes étroites, il ne peut pas être considéré comme entièrement représentatif d'une chaussée réelle. Il est donc nécessaire d'effectuer un essai similaire à celui réalisé par la direction des routes et de la circulation de Nouvelle-Galles du Sud, au cours duquel une planche de 20 x 2 m² a été coulée, puis observée pendant plusieurs mois.

Le nouvel essai devra être réalisé avec la formulation définitive (rapport eau/ciment dans les limites acceptables et mortier avec 3 % de fibres d'acier) et la planche d'essai devra être mise en œuvre sur un matériau bitumineux suffisamment rigide.

7.4.5 Déconstruction en fin de service et recyclage

Dans le cadre du projet Innoconcrete Eurêka (2003-2006), le LCPC a montré qu'un béton à ultra-hautes performances, semblable au EHFG, était facilement recyclable. Ce matériau, qui comprend des fibres d'acier et des granulats de bauxite calcinée, peut être concassé dans des exploitations d'extraction traditionnelles, pour obtenir d'une part, un sable de bonne qualité et, d'autre part, les fibres extraites de la matrice de ciment. Les deux produits peuvent être réutilisés dans de nouveaux mélanges pour fabriquer des matériaux aux propriétés similaires ou inférieures. Toutefois, dans le cas de l'EHFG, une question demeure : quel sera le comportement du matériau composite lors du fraisage avec un engin traditionnel ?

Bien que les installations modernes soient extrêmement puissantes et précises en termes de profondeur de fraisage, la possibilité de fraiser l'EHFG et de séparer ses différentes phases doit être vérifiée à l'aide d'essais en vraie grandeur.

7.5 Besoins de recherche immédiats

Les différents besoins de recherche et d'essai mentionnés aux paragraphes précédents peuvent être classés en quelques catégories. Les plus urgents sont résumés ci-dessous :

- Pour le bitume-époxy, quelques études en laboratoire doivent encore être réalisées avant les projets de démonstration, afin d'optimiser le profil de polymérisation avec la vitesse de réaction souhaitée, qui dépend des conditions locales (durée de polymérisation, distance de transport, mise en œuvre, etc.).
- Pour l'enduit hydraulique fibré gravillonné, l'adaptation des équipements existants ou le développement dans la pratique d'un nouvel équipement de mise en œuvre doivent être étudiés en priorité, afin d'appuyer les projets de démonstration pour les essais de terrain proposés en phase III (voir chapitre 9).

La conservation de l'énergie et la modélisation du bitume-époxy, ainsi que les questions communes liées au granulat, sont des aspects qui concernent davantage le long terme et ne sont pas déterminants pour les projets de démonstration envisagés en phase III.

NOTES

1. Sedran T. et Durand C., 19-22 septembre 2006, Recycling an Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete, Sixth International Symposium on Cement & Concrete CANMET/ACI International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development, Xi An, Chine.

8. QUESTIONS RELATIVES À LA CONSTRUCTION, ASPECTS ÉCONOMIQUES ET ÉVALUATION DU RISQUE

8.1 Introduction

Les recherches et les essais présentés aux chapitres 4 et 5, ainsi que les évaluations de ces résultats au chapitre 6, ont confirmé les applications potentielles du bitume-époxy et de l'enduit hydraulique fibré gravillonné aux couches de roulement à longue durée de vie. Ce chapitre étudie l'état de l'art concernant la production de mélanges en quantités commerciales et les méthodes éventuelles de construction de revêtements avancés avec ces matériaux. Il étudie quelques aspects et risques de construction envisagés, ainsi que les estimations de coûts pour l'utilisation de ces matériaux.

En ce qui concerne *la construction*, plusieurs éléments doivent être pris en compte : le rôle et les intérêts de l'autorité de gestion ou du maître d'ouvrage ; les matériaux utilisés et leurs conditions de traitement particulières dans un délai de construction raisonnable ; le transport ; les procédures de mise en œuvre ; les essais de qualité et de performance ; la sécurité sur le chantier et le contrôle du trafic ; la formation. Les enseignements tirés de la mise en œuvre des matériaux pour les essais accélérés, présentés aux chapitres 4 et 5, peuvent aider les responsables à définir avec les industriels les questions de construction, les risques et les conditions de traitement.

Sur le *plan économique*, l'étude de phase I a souligné que, pour assurer la viabilité économique, les revêtements à longue durée de vie ne seraient très probablement rentables que sur les routes à forte circulation, devraient avoir un coût situé dans une enveloppe définie au préalable (généralement trois fois supérieure au coût des couches de roulement traditionnelles) et devraient être évalués sur le cycle de vie du projet (30 à 40 ans), à l'aide de taux d'actualisation « raisonnables » (environ 6 %).

Après réalisation des essais, les coûts indicatifs des matériaux candidats devaient être étudiés de manière plus approfondie, en tenant compte de l'expérience acquise avec la préparation et les essais de phase II.

Il convenait également d'étudier les risques pour la *santé* et la *sécurité*, liés à l'utilisation des matériaux candidats, ainsi que les *aspects environnementaux*, notamment la recyclabilité des matériaux à la fin de leur durée de service.

Ces questions sont abordées en détail pour le bitume-époxy et l'enduit hydraulique fibré gravillonné dans les sections suivantes. Les aspects communs au bitume-époxy et au Enduit hydraulique fibré gravillonné sont traités dans les sections ultérieures.

8.2 Couches de roulement en bitume-époxy

8.2.1 Contexte et utilisation préalable du bitume-époxy

L'emploi du bitume-époxy pour les chaussées n'est pas nouveau. Ce matériau possède à son actif de nombreux exemples de développement et d'utilisation pour le revêtement d'importants ponts routiers depuis de nombreuses années.

Shell Oil a développé le bitume-époxy à la fin des années 50 comme carburéacteur et comme chaussée spéciale, résistante au souffle des réacteurs pour applications aéronautiques. En 1967, le bitume-époxy a été fourni pour une première application commerciale routière sur le tablier du pont San Mateo-Hayward au-dessus de la baie de San Francisco. Il 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. Récemment, cet usage s'est étendu en Chine, après la réalisation d'une évaluation rigoureuse, qui s'est terminée en l'an 2000 pour le premier pont et qui a démontré des qualités de résistance à la fatigue et à l'orniérage, ainsi qu'une capacité à supporter les températures extrêmes. Dix projets de tabliers de ponts ont récemment été achevés en Chine et au moins six autres devraient être entrepris en 2007¹.

Même si l'utilisation du bitume-époxy sur les ponts de longue portée est bien établie, elle est considérée comme une application spécialisée, adaptée à des conditions particulières (par exemple, rigidité du revêtement de support des tabliers de ponts). L'utilisation éventuelle de ce matériau pour des chaussées routières ordinaires n'avait pas été envisagée antérieurement, puisqu'il existait des matériaux moins coûteux qui étaient certes moins durables, mais qui pouvaient à chaque fois être remplacés assez facilement et pour un coût modéré.

On peut voir que les propriétés du matériau sont bien comprises et font l'objet d'une expérience portant sur de nombreuses questions de construction. Toutefois, il reste à réaliser le transfert de cette technique de matériau à la construction générale des chaussées routières.

8.2.2 Construction

Le bitume-époxy est un matériau d'une grande rigidité, qui peut être appliqué en couche de surface mince. L'expérience actuelle en matière de production n'est pas très vaste, même si le bitume-époxy a été utilisé assez largement pour les tabliers de ponts dans certains pays.

Les essais utilisant une centrale d'enrobage continue ont montré que la production à grande échelle du bitume-époxy « acide » était faisable moyennant quelques modifications mineures de la centrale, des engins ou des pratiques de construction. Un dosage précis et un mélange en ligne des deux composants sont essentiels, mais facilement réalisable avec un équipement de pompage traditionnel. Certains pays utilisent essentiellement des centrales d'enrobage discontinues, pour diverses raisons (changements de formulation aisés, malaxage par fraction, etc.). Ces centrales permettent un bon contrôle des durées de malaxage, qui jouent un rôle important dans le processus de polymérisation et sur les propriétés ultérieures du bitume. L'expérience acquise avec les centrales d'enrobage continues devrait être facilement applicable et valable pour les centrales d'enrobage discontinues.

Les sources locales existantes continueront d'être utilisées pour la sélection des granulats quand cela sera possible, tout en garantissant que les formulations développées supporteront les charges de trafic prévues, dans une grande diversité de situations. Élément important, les enrobés de bitume-époxy nécessitent des granulats naturels ayant certaines propriétés essentielles. Une angularité plus élevée dans les fractions de gros granulats, ainsi que des particules propres, angulaires et fines seront nécessaires pour obtenir des enrobés permettant d'atteindre l'objectif fixé d'une performance étendue sous les charges de trafic de plus en plus élevées que devront supporter les chaussées à longue durée de vie. Évidemment, des granulats de grande qualité offrant une résistance au polissage ne seront pas toujours disponibles localement, ce qui suscitera une préoccupation importante dans certaines régions.

Les composants essentiels des centrales d'enrobage sont les mêmes depuis de nombreuses années. Les centrales actuelles sont toutefois plus grandes, plus productives et plus sophistiquées, ce qui facilitera la production de bitume-époxy en quantités commerciales.

Les finisseurs actuels peuvent servir à la mise en œuvre des enrobés de bitume-époxy, mais un soin particulier devra être apporté à la formulation, afin qu'elle soit compatible avec la durée de construction nécessaire ou disponible. Cette méthode, lorsqu'elle sera utilisable, devrait être plus rentable et plus pratique que le développement d'un nouvel engin de construction pour les enrobés de bitume-époxy.

L'amélioration du contrôle de la centrale aidera à vérifier, sur le chantier, les proportions de bitume-époxy à deux phases et à produire des enrobés de grande qualité. L'amélioration de la gestion des matériels et des systèmes de surveillance y contribuera également. Les progrès suivants dans la gestion des centrales permettront aussi un meilleur contrôle des enrobés :

- Marquage ferromagnétique.
- Surveillance de la viscosité du liant.
- Prélèvement automatisé sur courroie des granulats.
- Sélection automatisée de la teneur en bitume.
- Surveillance automatisée de la température des enrobés.
- Surveillance automatisée de la teneur en liant.

Un bon contrôle est nécessaire non seulement à la centrale d'enrobage, mais pendant le transport, la mise en œuvre et le compactage. La durée de ces opérations et le rapport avec la température du mélange sont très importants. Un délai suffisant doit être prévu pour s'assurer que la réaction chimique s'est produite jusqu'à un certain point et que la viscosité du liant a augmenté jusqu'à un niveau acceptable, avant la mise en œuvre et le compactage. Bien que les températures de malaxage ne soient pas aussi élevées que pour le bitume traditionnel, une température suffisante doit être maintenue pour garantir un bon compactage. Il s'ensuit que de bonnes pratiques de chantier et un bon contrôle des procédures de transport doivent être établis, si cette technologie doit être utilisée à grande échelle pour les chaussées routières.

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.

8.2.3 Aspects économiques de la construction et de l'entretien

La construction et l'entretien sont toujours difficiles lorsque les encombrements sont très élevés. Néanmoins, les entreprises de travaux publics doivent être capables de remettre en état ou de remplacer les couches de roulement dégradées et ce, en maintenant la circulation ouverte sur des routes de plus en plus souvent embouteillées. Les intersections urbaines posent généralement des problèmes de construction particuliers pour assurer la fluidité du trafic.

Dans le passé, les organismes publics ont peut-être décidé que le bitume-époxy n'était pas un choix pertinent en raison de problèmes de constructibilité apparents, ainsi que du coût élevé des matériaux et

des coûts de construction connexes. Toutefois, en prévoyant une période pour permettre la prise de l'enrobé avant la mise en œuvre et le compactage, le bitume-époxy peut être ouvert à la circulation dès qu'il a refroidi jusqu'à température ambiante, afin de donner rapidement accès à une chaussée de grande qualité, à longue durée de vie, présentant des besoins d'entretien nettement réduits. Sur les tabliers de ponts, les chaussées routières sont généralement rouvertes dans un délai de 2 heures.

Les coûts du liant du revêtement de bitume-époxy seront plus élevés que pour les matériaux traditionnels. Il est probable qu'une partie du coût disparaîtra au fur et à mesure de l'utilisation du matériau et de l'augmentation des volumes, ce qui suggère une réduction avec le temps. D'autres composants (granulats, filler, etc.) ne devraient pas avoir un coût supplémentaire significatif. De même, les coûts des centrales de malaxage ne devraient pas être sensiblement différents, bien que des changements initiaux soient peut-être nécessaires pour permettre l'ajout d'un liant à deux phases. Les coûts de transport, de mise en œuvre et de compactage devraient être les mêmes que pour les matériaux traditionnels, même si au début, ces opérations pourraient exiger de faibles coûts supplémentaires pour les petites quantités et l'apprentissage initial. Des informations complémentaires sur les coûts sont fournies à la section suivante.

Il a toujours été entendu que l'adhérence d'un revêtement de bitume-époxy diminuerait avec le temps et pourrait nécessiter un traitement de régénération pendant la vie structurelle de la couche de surface. Ce traitement a été pris en compte dans l'analyse économique réalisée en phase I du projet, mais n'a pas été inclus dans les coûts des travaux initiaux, mentionnés dans ce chapitre. Les types de traitements possibles à mi-vie sont brièvement abordés au chapitre 7.

Les questions d'environnement ainsi que de santé et de sécurité au travail doivent être étudiées avec attention, en soulignant qu'elles peuvent varier en fonction de la formulation de la résine époxy et de l'agent de réticulation utilisé. Cet aspect, abordé à la section 8.2.5, ne devrait pas entraîner de conséquences significatives sur les coûts.

8.2.4 Coûts des matériaux et de la mise en œuvre

Le coût d'un revêtement en bitume-époxy sur une route à forte circulation devrait être très variable, selon la quantité utilisée et 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. Cependant, étant donné l'importance des coûts initiaux pour la viabilité économique d'un revêtement à longue durée de vie, une indication des coûts probables serait précieuse. Bien que l'expérience en la matière soit limitée, il devrait être possible d'effectuer une estimation à partir du prix du granulats naturel et du bitume-époxy nécessaires, ainsi que du prix habituel du malaxage, du transport et de la mise en œuvre, avec la technique de production actuelle.

En conséquence, les estimations de coûts pour un revêtement de bitume-époxy ont été étudiées dans les pays ayant des membres actifs dans le groupe de travail. L'expérience étant très limitée, seuls quelques pays ont pu fournir des estimations, en réponse au questionnaire diffusé. En ce qui concerne le bitume-époxy, il s'agit généralement d'un matériau de marque déposée. Les indications de coûts des fournisseurs sont essentiellement données sur la base d'une mise en œuvre au mètre carré. En évaluant les coûts au mètre carré, il s'est avéré que le coût total dépendrait, entre autres, de la quantité de bitume-époxy nécessaire par mètre carré et du tonnage total à fournir.

Les estimations fournies pour le bitume-époxy ont été réunies et les résultats pour l'Europe de l'Ouest sont indiqués au Tableau 8.1.

Tableau 8.1. Coûts indicatifs des revêtements de bitume-époxy

Revêtement de bitume-époxy (épaisseur 30 mm)	Coût indicatif* (euros par mètre carré)
Fraisage	0.75 – 1.25
Couche de liaison	6 - 10
Couche d'accrochage	0.25
Matériaux de couche de roulement	
<i>Sous-total des coûts de l'enrobé, dont malaxage, transport et mise en œuvre</i>	18 – 33.5
Total des coûts indicatifs d'une couche de roulement en bitume-époxy	25 - 45

* Coûts indicatifs en avril 2007.

Le coût total indicatif de fraisage d'une couche de surface existante et de mise en œuvre d'un revêtement de bitume-époxy pourrait varier entre EUR 25 et 45 par mètre carré.

Comparaison avec les coûts du revêtement traditionnel

Le questionnaire de phase II a également étudié les coûts actuels d'un revêtement traditionnel utilisant des matériaux de référence standard, en supposant une couche de surface mince de 30 mm ou une couche de roulement SMA, utilisées dans chacun des pays.

Les réponses ont indiqué que les coûts actuels d'un *revêtement traditionnel* pourraient être estimés à environ 20 EUR par mètre carré, en tenant compte des récentes hausses significatives des prix, notamment en Europe de l'Ouest. Le coût équivalent est de 27 USD, au cours du change (1 EUR ≈ 1.35 USD) en vigueur en avril 2007. Les coûts réels varient entre 13 et 25 EUR, selon le lieu.

Comparaison avec les estimations de phase I concernant les traitements traditionnels

Les coûts du revêtement traditionnel ont été préalablement identifiés en phase I du projet, pour servir de base aux travaux d'estimation des coûts sur la durée de vie et d'évaluation de la viabilité économique des revêtements avancés, dans le rapport de phase I. Les premières estimations de coûts ont été basées sur le questionnaire de phase I. Les résultats présentés dans le rapport de phase I incluaient les recommandations suivantes sur les estimations réalisées :

« 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 30 mm tous les 8 ans en cas de trafic très lourd, tous les 10 ans en cas de du revêtement : 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/m² pour la réparation de 30 mm de revêtement (enlèvement et remplacement)

Il a été supposé que pour la réparation du revêtement, la couche de surface existante serait fraisée et rabotée 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 réparation, 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. »

Cette estimation de coût du revêtement traditionnel (8 USD par mètre carré) a été utilisée pour les évaluations de la viabilité économique des revêtements avancés, à longue durée de vie, incluses dans le rapport de phase I. Les coûts indiqués dans le rapport de phase I sont en USD de décembre 2002 (cours moyen du change : 1 USD ≈ 0.98 EUR). À ce cours du change, le coût estimé du revêtement traditionnel de 8 USD par mètre carré en 2002 était équivalent à environ 8 EUR par mètre carré en prix de 2002.

Il est clair que les coûts des revêtements utilisant des matériaux traditionnels ont sensiblement augmenté en Europe, depuis 2002 (d'environ 8 EUR à environ 20 EUR par mètre carré) et que la hausse des prix en euros est encore plus élevée, après la conversion en dollars, au cours du change actuel.

L'importance des niveaux de coûts actuels par rapport à l'analyse réalisée en phase I et la comparaison avec les coûts de l'EHFG sont abordées plus en détail à la section 8.4.

8.2.5 Questions d'environnement et de cycle de vie

8.2.5.1 Questions de santé et de sécurité

Actuellement, le bitume-époxy peut être utilisé pour les couches de roulement et les enduits. Ce matériau contient plusieurs éléments en fonction du type de bitume et des composants utilisés dont certains peuvent provoquer une irritation de la peau. Ces produits chimiques peuvent comprendre des résines amine et époxy, du bitume, du goudron (également cancérigène), de l'asphalte et des bitumes naturels, ainsi que plusieurs solvants organiques.

Les produits chimiques utilisés peuvent varier et les *systèmes polymérisés aux acides gras* utilisés dans la plupart des essais décrits dans le présent rapport n'ont pas entraîné de risques plus élevés que le bitume traditionnel, après la prise de quelques précautions supplémentaires par rapport aux bonnes pratiques habituelles.

À l'état *non polymérisé*, certains matériaux époxy se caractérisent par des composants hautement allergènes et peuvent provoquer un eczéma allergique de contact lorsqu'ils sont utilisés. L'expérience acquise avec les applications sur tabliers de ponts indique que la principale période suscitant des préoccupations pour la sécurité des opérateurs se situe pendant les travaux à la centrale d'enrobage. Les personnes manipulant des produits époxy non polymérisés doivent être conscientes des problèmes éventuels et porter des vêtements de protection, notamment des gants, comme pour les produits bitumineux similaires, mais aussi d'autres, si nécessaire.

Dans certains pays, les préoccupations liées à la sécurité au travail lors de l'emploi de composants époxy constituent un sujet délicat et certaines réglementations ont été promulguées. Il est essentiel que ces exigences soient vérifiées avant l'utilisation du bitume-époxy, que les conditions de mise en oeuvre des matériaux soient évaluées et que les précautions nécessaires soient prises. Toute réserve des autorités de santé doit donc être mise en évidence et résolue à ce stade.

8.2.5.2 Questions d'environnement

Le recyclage des chaussées en bitume traditionnel est un précieux atout pour le secteur routier. Mais l'expérience du recyclage du bitume-époxy est réduite ; certaines questions sur les impacts environnementaux n'ont pas encore été résolues. Toutefois, si le matériau est enlevé de la route à l'aide de moyens mécaniques à froid (fraisage ou rabotage), une réutilisation sous forme de produit concassé, sans effets nocifs, peut être envisagée.

Étant donné que le matériau est thermodurcissable et ne ramollit pas sous la chaleur, il est plus difficile de l'utiliser pour un recyclage à chaud comme dans le cas du bitume traditionnel. Si le matériau arraché est chauffé et utilisé comme granulat dans un nouveau matériau, des études complémentaires peuvent être nécessaires pour examiner la toxicité éventuelle des émissions. Si le matériau est stocké pour une réutilisation ou une mise au rebut, la possibilité d'écoulements nocifs doit également être étudiée.

8.3 Couches de roulement en enduit hydraulique fibré gravillonné

8.3.1 Construction

Le béton fibré à hautes performances, développé et testé pendant les travaux de phase II est un matériau d'une grande rigidité, qui nécessite une bonne adhésion au support lorsqu'il est appliqué en couche de surface mince. La recherche a montré que ce matériau à surface de granulat en bauxite calcinée à adhérence élevée pouvait servir à construire des couches de roulement aux performances améliorées pour résister aux sollicitations climatiques et aux charges de trafic. Le matériau a été conçu et les essais ont été réalisés en envisageant l'utilisation de la surface bitumineuse existante comme support.

Les questions de construction importantes concernant ce matériau sont les suivantes :

a) *Disponibilité des matériaux constitutifs.* Les exigences relatives à la composition des matériaux constitutifs sont sévères, notamment en ce qui concerne la granulométrie des particules très fines (au-dessous de 75 µm). Actuellement, il semble que les matériaux adéquats puissent être obtenus dans la plupart des régions. Cependant, ces dernières années ont connu une pénurie de la fumée de silice utilisée dans le secteur de la construction. Jusqu'à maintenant, cette pénurie n'a eu d'impact que sur les prix de cette addition minérale. À l'avenir, elle pourrait être problématique. Dans de telles circonstances, il existerait quelques stratégies de remplacement : production de fumée de silice à partir de roche de silice (quartz) ou utilisation de certains microfillers lithiques naturels en substitution de la fumée de silice (mais leurs performances ne seront pas nécessairement suffisantes).

b) *Malaxage.* Les essais en laboratoire ont permis d'observer que le béton était très visqueux et qu'une durée de malaxage prolongée (jusqu'à 15 min) était nécessaire pour établir la dispersion complète des particules ultra-fines. Cette dispersion est indispensable pour obtenir les propriétés de fluidité, maniabilité et adhésion de la matrice et est bien connue dans le malaxage des autres bétons de très hautes performances. Il semble que ce matériau puisse être fabriqué dans n'importe quel malaxeur de bonne qualité. Un autre aspect qui doit être abordé avant de passer à la production à grande échelle est la procédure de nettoyage des équipements de malaxage. Une séquence de nettoyage pendant la journée de production devra probablement être établie.

c) *Maniabilité*. Les essais de malaxage et de mise en œuvre au TRL ont indiqué que le mélange initialement proposé était trop rigide. Après un malaxage expérimental, une quantité supérieure d'eau a été ajoutée au mélange pour obtenir un matériau plus maniable. Bien qu'une perte de résistance ait été observée, elle n'a pas semblé suffisante pour être préjudiciable, tout au moins à court terme.

Les autres questions de construction qui doivent être abordées pour développer une couche de roulement en EHFG sont les suivantes :

- Pour assurer une bonne adhésion durable des gravillons de bauxite avec la matrice de béton, les gravillons doivent être bien enchâssés, dans l'idéal probablement sur 1/2 et 2/3 de la taille du granulats, afin d'obtenir une profondeur de texture de 1.0-1.5 mm.
- La mise en œuvre ne doit pas être réalisée sous la pluie ni sous une température inférieure à 5° C et les gravillons doivent se trouver à l'état saturé, surface sèche au moment de l'épandage.
- L'épandage des gravillons doit, dans l'idéal, être réalisé immédiatement après la mise en œuvre de la couche de mortier mince, c'est-à-dire avec le même engin ou avec un gravillonneur. Une légère opération de compactage ou de damage est nécessaire pour assurer un bon enchâssement des gravillons.
- Pour réduire les émissions acoustiques, les gravillons doivent être répartis en une couche plane, unie et régulière. Étant donné qu'ils sont relativement coûteux, les gravillons excédentaires pourraient être recueillis à l'aide d'un aspirateur, après le passage de l'engin, comme cela se fait pour les enduits. Le produit de cure doit être appliqué après l'épandage des gravillons.
- Il n'existe peut-être pas actuellement de finisseurs adéquats. Un développement ou une modification des équipements existants seront nécessaires.

8.3.2 *Aspects économiques : construction et entretien*

Les fréquentes opérations d'entretien nécessaires sur certaines couches de roulement justifient la rentabilité d'une reconstruction avec de l'Enduit hydraulique fibré gravillonné. De nombreuses questions de construction doivent cependant être résolues pour exploiter au mieux cette solution.

Il convient d'étudier trois éléments pour s'assurer que cette forme de mise en œuvre n'est pas plus longue qu'une autre :

- Méthodes pour accélérer la vitesse d'acquisition de la résistance.
- Méthodes pour réduire la durée de construction en fonction de la durée de prise du mortier.
- Stratégies de contrôle du trafic pour réduire les retards occasionnés aux usagers.

Les avantages seraient évidents si les couches de roulement en Enduit hydraulique fibré gravillonné pouvaient être utilisées pour la réfection de chaussées existantes, en bitume ou en béton, ainsi que pour de nouvelles chaussées. Les questions suivantes doivent être étudiées avant que l'EHFG ne puisse être considéré comme une solution réalisable :

- La chaussée existante doit avoir une capacité de portance élevée (sa durée de vie résiduelle doit correspondre au moins à la durée de vie attendue de la nouvelle couche de roulement) et ne doit pas présenter de fissures visibles.

- La surface de l'ancienne chaussée doit être préparée, soit en réduisant son épaisseur en raison de l'orniérage et en utilisant un matériau de remplissage approprié, soit par fraisage, grenailage ou autre procédé, afin d'assurer une bonne liaison entre la couche de roulement en Enduit hydraulique fibré gravillonné et le bitume ou le béton sous-jacent.
- La couche à mettre en œuvre doit respecter des exigences d'uni de surface très sévères, c'est-à-dire similaires aux exigences applicables aux couches de roulement normales, car la couche de roulement en EHFG a une épaisseur maximale d'environ 8-10 mm, et ne pourra donc rattraper d'éventuels défauts d'uni.

8.3.3 Coûts des matériaux et de la mise en œuvre

Les coûts de fabrication et de mise en œuvre sont plus difficiles à évaluer pour une couche de roulement en Enduit hydraulique fibré gravillonné qu'en bitume-époxy, car l'expérience en matière de fourniture est inexistante. Il devrait être possible d'évaluer le prix essentiellement à partir du prix des matériaux constitutifs et des prix du malaxage, du transport et de la mise en œuvre. Les coûts des matériaux, du malaxage et du transport peuvent être évalués en fonction des pratiques actuelles. En revanche, les coûts de la mise en œuvre peuvent être plus difficiles à évaluer, si un équipement nouveau ou adapté doit être développé.

Comme pour le revêtement de bitume-époxy, les estimations de coûts pour le revêtement d'enduit hydraulique fibré gravillonné ont été demandées aux pays ayant des membres actifs dans le groupe de travail. Le tableau suivant est considéré comme une évaluation réaliste des coûts indicatifs en vigueur en Europe de l'Ouest. Les coûts estimés de la préparation et des couches bitumineuses inférieures sont similaires à ceux valables pour le bitume-époxy.

Tableau 8.2.a **Évaluation des coûts indicatifs de l'EHFG**
(prix 2006, Europe de l'Ouest)

Matrice d'EHFG avec gravillons			Coût
Matériaux	Quantité (kg par m ³)	coût	(EUR par m ³)
Sable siliceux	890 kg	15 EUR/t	13.35
Ciment CEM I	1 020 kg	90 EUR/t	91.80
Fumée de silice	205 kg	270 EUR/t	55.35
Eau	220 kg	10 EUR/t	0.22
Superplastifiant	3 kg	6 EUR/kg	18.00
Fibres d'acier	230 kg	3 EUR/kg	690.00
Sous total			868.72
Déchets éventuels, etc.			31.28
Coût du matériau par m³			900.00

Tableau 8.2.b **Évaluation des coûts indicatifs de l’EHFG**
(prix 2006, Europe de l’Ouest)

Coûts de production de l’EHFG par m²	
Postes de dépenses	(EUR par m ²)
Matériaux d’EHFG, 0.01 x 900 (épaisseur de 10 mm, comme indiqué plus haut)	9.00
Malaxage de l’EHFG, 0.01 x 50	0.50
Transport, 0.01 x 20	0.20
Mise en œuvre, gravillons compris	5.00
Coût direct total par m²	14.70
Frais généraux, gestion du chantier, risques et bénéfices	3.30 – 7.30
Coût estimé par m²	18.00 – 22.00

Remarque : s’il est vrai que les coûts des matériaux ne sont pas très différents d’un pays à l’autre dans le monde développé, les coûts de la main d’œuvre peuvent varier considérablement.

Ces chiffres laissent penser que l’enduit hydraulique fibré gravillonné pourrait être disponible à un coût moins élevé que le bitume-époxy, mais cela est en partie dû au fait que la couche sera beaucoup plus mince. Rappelons également que les incertitudes concernant les matériaux et les coûts de l’EHFG demeureront tant que des quantités plus élevées n’auront pas été fabriquées et mises en œuvre.

8.3.4 *Questions d’environnement et de cycle de vie*

8.3.4.1 *Questions de santé et de sécurité*

Le transport des matériaux, ainsi que le malaxage et la mise en œuvre de l’Enduit hydraulique fibré gravillonné nécessiteront les mêmes précautions que pour tout béton. Le ciment, les autres fines et les fibres utilisés dans le mélange peuvent irriter les yeux, les poumons et la peau ; une protection adéquate sera donc nécessaire.

Après l’ajout d’eau et le malaxage, le matériau peut encore irriter la peau. Des gants seront donc nécessaires, comme pour la mise en œuvre d’un béton traditionnel. Les opérateurs devront se laver les mains et le visage après avoir travaillé avec le matériau. Tout additif chimique utilisé dans l’Union européenne peut nécessiter un enregistrement, conformément à la directive REACH (voir 8.2.4.2).

8.3.4.2 *Évaluation sur le cycle de vie*

Le recyclage d’un béton traditionnel est un précieux atout pour le secteur routier, car le béton concassé est une ressource intéressante pour de nombreux projets routiers. Les questions relatives aux possibilités de recyclage d’une couche d’EHFG concernent les aspects pratiques et environnementaux dont certains ont été soulevés au chapitre 5.

Le matériau adhère fermement au support bitumineux. Tout matériau de recyclage serait donc un mélange de bitume et de béton, qui pourrait être utilisé en tant que tel ou séparé en deux parties. Si le

matériau est enlevé de la route par des moyens mécaniques à froid, il devra être traité comme un béton concassé, ce qui soulèverait peu de questions environnementales. S'il est réchauffé (probablement pour enlever le bitume de liaison), l'opération soulèverait les mêmes questions concernant les émissions que le recyclage du bitume.

Étant donné que le matériau contiendra probablement des fibres d'acier, il conviendra également d'étudier ses conditions de recyclage. Il a été découvert récemment que lors du concassage d'un béton fibré à ultra-hautes performances, semblable à l'enduit hydraulique fibré gravillonné, il était facile de séparer les fibres de la matrice et de les réutiliser dans un nouveau matériau, pour obtenir le même effet de renforcement qu'avec des fibres neuves. Cela laisse entrevoir que le recyclage du béton fibré ne serait pas différent et ne nécessiterait pas de mesures particulières.

8.4 Comparaisons d'estimations de coûts – Couches de roulement en bitume-époxy et en enduit hydraulique fibré gravillonné

Des estimations indicatives pour les revêtements de bitume-époxy et d'enduit hydraulique fibré gravillonné ont été données séparément dans les sections précédentes.

Cette section présente une comparaison entre les coûts indicatifs de ces matériaux, ainsi qu'entre ces estimations et les coûts des revêtements actuels construits à l'aide de matériaux traditionnels (de référence).

Les réserves à émettre sur les estimations de coûts pour les solutions en bitume-époxy et en Enduit hydraulique fibré gravillonné sont les mêmes que précédemment :

- Le coût d'un revêtement en bitume-époxy sur une route à forte circulation devrait être très variable, selon la quantité utilisée et 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.
- En évaluant les coûts au mètre carré, il s'est avéré que le coût total dépendrait, entre autres, de la quantité de bitume-époxy nécessaire par mètre carré et du tonnage total à fournir.
- Les coûts indicatifs des couches de roulement en enduit hydraulique fibré gravillonné 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). Les coûts estimés de la préparation et des couches bitumineuses inférieures sont similaires aux coûts estimés pour le bitume-époxy.

Les estimations de coûts pour les revêtements traditionnels, fournies par plusieurs pays, portent généralement sur une couche de surface mince de 30 mm ou sur une couche de roulement de type SMA, utilisées dans chacun des pays.

Les réponses au questionnaire ont indiqué que les coûts actuels d'un *revêtement traditionnel*, qui ont sensiblement augmenté, notamment en Europe de l'Ouest, pourraient être estimés à environ 20 EUR par mètre carré. Les coûts réels varient entre 13 et 25 EUR, selon le lieu.

Le Tableau 8.3 présente les coûts indicatifs d'un bitume-époxy, d'un enduit hydraulique fibré gravillonné et d'un bitume traditionnel « mince » de 30 mm, généralement utilisé comme matériau de base standard. Les chiffres sont considérés comme des évaluations réalistes de coûts indicatifs, valables en Europe de l'Ouest.

Tableau 8.3. Comparaison des coûts entre matériaux

Coûts d'un revêtement courant en EUR/m ² (Europe de l'Ouest)			
Description	Couche de roulement en bitume-époxy de 30 mm	Couche de roulement en enduit hydraulique fibré gravillonné 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.		

Le Tableau 8.3 suggère 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 (grâce aux travaux réalisés), 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 est inférieur à 6 % par an et si le revêtement avancé ne coûte pas plus de trois fois le traitement 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'usager, occasionnés par les opérations d'entretien. Les estimations établies dans le Tableau 8.3 s'avèrent cohérentes, de manière générale, avec cette enveloppe de coûts.

8.4.1 Coûts d'entretien sur le cycle de vie

Concernant la viabilité économique, les coûts supplémentaires liés à l'utilisation de matériaux avancés pour le revêtement de chaussée doivent être compensés par les avantages liés à un allongement important des intervalles entre les opérations d'entretien, ainsi qu'à la réduction des impacts de l'entretien sur les usagers en termes de retards, consommation de carburant, émissions et autres impacts environnementaux, tels que le bruit.

Les essais en laboratoire et les essais de chaussée accélérés ont indiqué que les revêtements avancés pourraient avoir une résistance plus élevée et une durée de vie beaucoup plus longue, ce qui réduirait considérablement les besoins d'entretien. Cependant, aucune série d'essais contrôlés et

surveillés n'a encore été réalisée pour les chaussées routières à forte circulation. L'expérience acquise avec l'utilisation du bitume-époxy sur les tabliers de ponts est considérée comme utile et rassurante. Toutefois, les conditions étant différentes sur les chaussées routières, elle ne peut pas être tenue pour une preuve de performance ni même de réduction des besoins d'entretien. Bien qu'on puisse prévoir une durée de 30 ans pour ces revêtements, toute estimation des intervalles d'entretien est incertaine, tant que d'autres essais n'ont pas été réalisés.

Cependant, étant donné que les encombrements augmentent sur la plupart des routes, au point que toute opération d'entretien devient inacceptable pour les usagers ou les maîtres d'ouvrage, il est possible que le coût supplémentaire lié à l'utilisation des matériaux de revêtements avancés ne constitue plus une question importante face aux besoins de réparation. De même, l'augmentation continue du volume de trafic et des embouteillages, ainsi que les pressions des usagers, des administrations routières et des responsables politiques, pourraient réduire les réticences soulevées par les coûts initiaux des revêtements avancés.

Remarquons également que si l'estimation du coût des revêtements avancés était auparavant très élevée par rapport aux traitements traditionnels, il semble que l'écart se soit resserré en raison, d'une part, d'une meilleure compréhension des techniques de construction et des équipements nécessaires et, d'autre part, des récentes hausses de prix des revêtements traditionnels.

Évidemment, toute analyse réalisée pour un pays déterminé doit prendre en compte l'ensemble des impacts et des avantages liés à l'utilisation de ces matériaux, ainsi que les coûts pour les usagers, qui doivent servir de base à toute analyse des coûts sur la durée de vie. Les coûts des travaux d'entretien et des retards pour l'utilisateur varient considérablement d'un pays à l'autre. De même, les incitations et les politiques adoptées pour rendre les opérations d'entretien acceptables sur les routes très fréquentées sont conçues de différentes manières.

Dans ce contexte, c'est évidemment à chaque pays d'envisager et de décider au cas par cas, en analysant ses données nationales, les conditions dans lesquelles 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.

NOTES

1. Pour plus d'informations, voir le site Web de Chemco Systems : www.chemcosystems.com/epoxy.html
2. Un soin plus important est apporté à la gestion des stocks afin de réduire la ségrégation. Il existe, par ailleurs, une tendance à l'utilisation de centrales fermées pour maintenir une humidité uniforme dans le granulats et supprimer les plaintes du voisinage concernant la poussière, notamment en zone urbaine. Le stockage de plusieurs tailles de granulats dans des trémies doseuses multiples (pour déverser les proportions recommandées de granulats dans le tambour sécheur rotatif ou autre équipement de séchage) demande également un contrôle délicat de la ségrégation. À l'avenir, les extracteurs actuels à tiroir, à tapis et vibrants seront améliorés grâce à des commandes et des systèmes de pesage électroniques perfectionnés.

3. Pour les États membres de l'Union européenne, la Commission a adopté le règlement (CE) 1907/2006 (JOUE L396 du 30 décembre 2006) concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques (REACH) qui vise toutes les substances chimiques produites ou importées en quantité supérieure à une tonne par an et, par conséquent, l'ajout de produits chimiques et d'additifs aux liants bitumineux. Pour plus d'informations, consulter le site Web : http://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/reach_intro.htm.

9. ESSAIS DE PHASE III

9.1 Prochaine étape dans le processus d'innovation

Lorsque ce projet a d'abord été proposé et accepté dans le programme de travail 2001-2003 du Comité de recherche sur les transports routiers de l'OCDE, une troisième phase a été clairement envisagée. La première phase devait porter sur l'étude de la viabilité technique et économique, la deuxième sur le développement et les essais de matériaux et la troisième sur les essais visant à tester les meilleurs matériaux candidats sur le terrain.

Après réalisation de la phase II, comprenant une vaste étude avec essais en laboratoire et différents essais de chaussée accélérés sur installations appropriées, le projet a avancé jusqu'au point où les essais de terrain limités, en conditions de trafic (sur le réseau routier ou hors route), constituent logiquement la phase suivante.

La transition vers les essais en vraie grandeur est un moment décisif dans tout processus d'innovation, y compris dans ce projet. Les travaux à petite échelle et d'un coût limité sont terminés ; ils ont confirmé, avec quelques réserves, que les deux concepts de chaussée très différents méritaient l'attention des décideurs chargés de la gestion des routes. De nouvelles avancées vers une mise en œuvre à grande échelle sont nécessaires si les avantages économiques potentiels de ces matériaux et de ces techniques doivent se réaliser. Il est également évident, comme toujours lors d'essais à grande échelle de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques, qu'il existe des risques.

Les perspectives de durabilité et de longévité des matériaux sont basées sur les extrapolations des observations réalisées pendant la phase du projet décrite dans le présent rapport. En conséquence, le comportement des matériaux ne peut pas être garanti sur les périodes extrêmement longues, requises pour les chaussées à longue durée de vie. Il en est toujours ainsi dans la recherche sur les chaussées. Cela explique en partie pourquoi les améliorations sont lentes et progressives, généralement basées sur des développements de types de chaussée connus dont les performances sont éprouvées. Enfin, une mise en œuvre inappropriée et des opérations de construction mal réalisées peuvent compromettre les performances de la chaussée, quelle que soit la qualité du matériau et du dimensionnement.

Ce projet vise néanmoins à apporter des améliorations radicales, grâce à des matériaux nettement différents de tous les types de chaussée utilisés couramment sur nos routes. Si cet objectif est poursuivi et si les perspectives ouvertes par cette phase d'étude se rapprochent peu à peu du réalisable, certains usagers devront engager la troisième phase, avec un risque concret que le comportement réel de ces chaussées n'atteigne pas les niveaux actuellement envisagés.

On suppose que quelques administrations routières, peut-être en partenariat avec les industriels, seront prêtes à entreprendre cette étape. Ce chapitre fixe un cadre qui pourrait servir à coordonner ces initiatives et à organiser une coopération entre les participants, afin de tirer au mieux parti des enseignements de l'expérience.

9.2 Cadre d'essais coordonnés

La pratique habituelle des administrations routières nationales est d'introduire une nouvelle technologie dans leur pays et, bien après, de recueillir et d'échanger des informations sur leur expérience dans le domaine. Ce sont des étapes importantes qui contribuent à l'évaluation et à la reconnaissance des bonnes pratiques. Cette méthode sera toujours un moyen de diffuser des progrès techniques entre pays coopérants. Toutefois, la planification et la coordination conjointe des essais et des démonstrations permettent d'accélérer le processus d'établissement en commun de bonnes pratiques universelles. Telle est l'approche proposée dans ce rapport et présentée dans les sections suivantes.

9.3 Opportunités de programmes

Le cadre des travaux semble favoriser le lancement d'essais sur le terrain et de démonstrations en coopération, sur les matériaux de revêtements de chaussées à longue durée de vie qui ont été testés et développés au cours du projet.

Les grands programmes de recherche internationaux et régionaux ont démontré depuis longtemps l'intérêt de la coopération internationale et sont de plus en plus chargés de la transition décisive entre recherche et usage courant, c'est-à-dire précisément de la phase « d'essais sur le terrain et de démonstrations » dans le processus d'innovation. Parallèlement, les administrations routières nationales ou régionales ont établi, de manière générale, des cadres formels de coopération et d'échange de connaissances, qui prévoient de plus en plus souvent la poursuite conjointe d'objectifs stratégiques communs nécessitant recherche et développement technologique.

Ces programmes de recherche en coopération sont notamment les suivants :

- Le 7^e Programme cadre de recherche et de développement technologique (PCRDT) européen, chargé d'apporter, sur la période 2007-2013, un financement majeur à la recherche en matière d'infrastructures routières, élément fondamental du programme de transport routier.
- Le 2^e Programme américain stratégique de recherche routière (SHRP-2).
- Le programme routier européen ERA-NET, au sein duquel douze administrations routières nationales ont joint leurs forces pour coordonner et cofinancer davantage les éléments budgétaires en fonction des stratégies nationales de recherche ayant les mêmes objectifs.
- Le programme AUSTRROADS, qui encourage la coopération et l'échange de connaissances entre les administrations routières australiennes et néo-zélandaises.

9.4 Objectifs

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 :

- Tirer parti des opportunités pratiques et économiques offertes par les essais, afin de développer des pratiques réalisables et sûres pour la production et la mise en oeuvre des matériaux de chaussées en grande quantité.
- 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 charge et d'environnement variables et avec différentes qualités de bitume sous-jacent, et indiquer les limites de cette approche.
- Étudier les effets de variations limitées dans les propriétés des granulats, s'ils influent sur les propriétés de frottement à long terme, ainsi que sur la granulométrie du granulat et la formulation du mélange.
- Mesurer les propriétés acoustiques des chaussées d'essai en conditions réelles de trafic.
- Élaborer des méthodes de réparation des défauts dus à un non respect des normes ou à un changement imprévu de la surface ou du support.
- Étudier les possibilités de recyclage et d'utilisation des matériaux.
- Améliorer le niveau de confort des maîtres d'œuvre travaillant essentiellement avec les matériaux de chaussées traditionnels en leur offrant la possibilité d'acquérir de l'expérience sur ces matériaux de chaussées avancés.

Le dernier point est particulièrement important puisque cette expérience est actuellement inexistante et que les coûts élevés sont peut-être surestimés (nette différence de prix de la construction avec le bitume-époxy), partiellement en raison de la crainte d'un durcissement prématuré du bitume-époxy ou d'une durée inadéquate de mise en œuvre. On peut espérer qu'avec l'apprentissage, les maîtres d'œuvre adapteront les pratiques de construction aux nécessités et qu'avec l'expérience et l'augmentation des volumes, les coûts de mise en œuvre des revêtements avancés finiront par baisser.

Les objectifs secondaires sont différents selon le type de matériau et sont décrits plus en détail en 9.4.2 et 9.4.3.

Pour obtenir une confirmation quantitative des résultats des essais au regard des performances des chaussées (par rapport aux études précédentes et aux essais coordonnés des autres participants), une instrumentation commune et limitée sera nécessaire.

9.4.1 Conditions et objectifs spécifiques des essais sur le terrain des deux matériaux

Les résultats des essais en laboratoire et des essais accélérés des bitumes époxy et des bétons à hautes performances réalisés dans ce projet ont différentes conséquences sur le champ des essais de terrain à entreprendre pour chacun des matériaux.

De manière générale, 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 bitume-époxy non polymérisé, qui ont entraîné d'importantes limitations d'utilisation dans certains pays.

Le béton fibré à hautes performances ne devrait pas poser ce problème, mais soulève quelques difficultés réelles concernant la mise en œuvre rapide et précise de la mince couche de chaussée et l'épandage de la couche de granulats résistants au frottement, en un seul et même passage. En outre, bien que les essais aient confirmé que les fibres d'acier pourraient éviter les fissurations importantes, une incertitude demeure concernant le comportement du matériau en cas de construction de chaussées plus longues, qui seront exposées au trafic. La capacité de ce tapis très mince à adhérer à la chaussée sous-jacente sans provoquer une délamination de la couche de base le long des bords n'est pas encore établie. Les essais accélérés se poursuivent à l'heure où nous rédigeons ce rapport et donneront de meilleures indications sur ces phénomènes. Toutefois, le groupe estime que ces dernières incertitudes seront mieux résolues, après réalisation des essais accélérés et diffusion des résultats, par des essais de terrain limités sur route.

9.4.2 Objectifs des essais spécifiques aux chaussées en bitume-époxy

Les objectifs des essais spécifiques au bitume-époxy sont variés. Étant donné la durée prévue de ces essais et la durabilité attendue de ces revêtements, il y a peu de chances de réunir rapidement un grand nombre d'informations nouvelles sur les performances. Le principal objectif des essais de terrain sur le bitume-époxy concernera plus probablement la cohérence des caractéristiques de construction, de mise en œuvre et de prise (notamment, le contrôle qualité, la consistance en profondeur, l'amélioration de la prise, etc.). Toute réserve des autorités de santé devra être mise en évidence et résolue à ce stade. Sur le court terme, les essais pourraient porter sur la propagation des fissures et sur la durabilité du bitume-époxy utilisé comme béton bitumineux drainant.

À plus long terme, les essais de terrain devraient également apporter des informations sur les éléments suivants :

- Matériaux disponibles localement, par opposition aux matériaux d'un même fournisseur.
- Détermination des performances des bitumes époxy selon la formulation chimique.
- Détermination de l'effet du type de granulat sur les caractéristiques des couches de surface à longue durée de vie.
- Essais sur différentes épaisseurs de couche de bitume-époxy afin de déterminer la plus appropriée.
- Essais sur plusieurs couches de base bitumineuses dans des régions aux climats différents pour évaluer les effets de la température et de l'humidité sur la chaussée composite.

Des essais sur plusieurs couches de base en béton de ciment Portland sous différents climats permettront d'évaluer la propension à la propagation de fissures et au décollement.

9.4.3 Objectifs des essais spécifiques aux chaussées en enduit hydraulique fibré gravillonné

Les objectifs des essais spécifiques de l'enduit hydraulique fibré gravillonné sont également variés. En revanche, il est plus probable d'obtenir rapidement de nouvelles données sur les performances. Les essais pourraient permettre également d'étudier les sollicitations dans l'EHPG, les

différents coefficients de dilatation du béton bitumineux et le niveau d'humidité acceptable de la chaussée.

À plus long terme, les essais de terrain devraient également apporter des informations sur les éléments suivants :

- Utilisation des matériaux disponibles localement, par opposition aux matériaux d'un même fournisseur.
- Développement de techniques de mise en œuvre du mortier et d'insertion des gravillons (pouvant nécessiter la modification des équipements existants ou le développement d'un nouvel équipement).
- Essais sur plusieurs couches de base bitumineuses, de rigidité différente.
- Essais sur différents mélanges d'un rapport eau/ciment variant entre 0.20 et 0.30, afin de trouver un compromis raisonnable entre la facilité de malaxage, transport et mise en œuvre et les performances du matériau durci.
- Essais de méthodes pour éviter la perte d'humidité et surveiller le retrait libre sur échantillons de chaussée.
- Vérification des calculs par éléments finis et des apports de données (enregistrement du profil de température dans l'enduit hydraulique fibré gravillonné et le bitume, déformation réelle le long des bords et surveillance du développement de microfissures par essais pétrographiques).

9.5 Calendrier

Étant donné que le programme d'essais sur le terrain inclura des recherches internationales en coopération, le calendrier des essais de terrain coordonnés doit prévoir des délais suffisants pour la réalisation et la coordination des activités entre les pays et les organismes concernés. Il devrait comprendre les étapes et les dates suivantes :

N°	Étapes du programme d'essais sur le terrain	Dates
1	Diffusion des informations aux participants potentiels (distribution du présent rapport) et étude de ces informations par les participants potentiels	Sept. 2007 – Mars 2008
2	Préparation d'un cadre approprié pour les activités conjointes et identification des sources possibles de financement en commun	Jan. 2007 – Sept. 2008
3	Réunion préparatoire pour les participants engagés et accord sur un protocole commun, les informations régulières et le rapport final	Avr. 2008 – Juin 2008
4	Début des essais	Sept. 2008 – Mai 2009
5	Conduite des essais et examen des activités à mi-parcours	Sept. 2008 – Mai 2011
6	Fin des essais et remise du rapport final de chaque participant	Sept. 2010 – Juil. 2011
7	Rédaction du rapport final des activités conjointes	Août 2011 – Déc. 2011

Les essais sur le terrain exigeront évidemment une planification minutieuse, mais à ce stade, il pourrait être utile pour les administrations et les participants potentiels de présenter le contenu de chaque étape proposée, sur cette feuille de route. Ces étapes sont décrites en détail ci-dessous :

- Étape 1 : Elle commence avec la publication de ce rapport et se poursuit par une période appropriée pour donner suffisamment de temps aux administrations routières intéressées d'en discuter en interne et en externe et d'inclure ces travaux dans leur calendrier. Bien qu'il n'envisage pas de participer à la coordination des essais, le CCRT est prêt à inscrire, pendant cette période, les organismes qui exprimeront leur souhait de se joindre aux activités.
- Étape 2 : Un groupe de participants au projet travaille à l'établissement d'un cadre approprié pour la phase d'essais planifiés, afin de trouver des opportunités dans les grands programmes d'innovation nationaux et internationaux.
- Étape 3 : Si cette demande d'essais conjoints aboutit à un minimum de trois offres d'essais sur l'un quelconque des matériaux, une réunion est convoquée par l'organisation hôte (voir section 9.6 ci-dessous), mais est présidée et fait l'objet d'un compte rendu par un représentant des participants potentiels. La ou les réunions préparatoires doivent désigner un coordinateur de projet, ainsi que discuter et convenir des programmes et des principes essentiels des essais. Toute personne se joignant ultérieurement à ces essais doit accepter les principes de participation établis.
- Étape 4 : Les participants peuvent commencer les essais à la date qui leur convient, après la réunion préparatoire, et au plus tard en mai 2009.
- Étape 5 : Les essais doivent durer au moins deux ans et les premiers résultats doivent être disponibles en mai 2011.
- Étape 6 : Les participants doivent remettre leurs rapports finaux dans les trois mois suivant la fin de leurs essais et au plus tard en juillet 2011.
- Étape 7 : Le coordinateur de projet de chaque série d'essais doit rédiger la version provisoire du rapport final en se fondant sur la documentation remise par les participants. Une dernière réunion doit être organisée pour réviser et finaliser le rapport.

9.6 Organisation hôte

Afin que l'étude de phase III sur les chaussées à longue durée de vie ait la crédibilité et l'autorité nécessaires pour attirer des partenaires sérieux et engagés, il doit être mené sous les auspices d'une organisation internationale reconnue et appréciée par la communauté routière.

Inversement, l'organisation hôte doit être assurée d'être associée à un projet international ayant de vastes implications sur la construction et l'entretien des routes à fort trafic.

Élément important, le projet doit être organisé et financé de façon que l'organisation hôte ne subisse pas de fortes répercussions financières, même s'il est prévu qu'elle devra supporter le coût du rapport final.

Les phases I et II du projet du CCRT (initialement l'OCDE) sur les chaussées à longue durée de vie ont attiré un intérêt et des participants venus d'Europe, d'Amérique du Nord, d'Australasie et d'Asie de l'Est. Il semble donc opportun de se tourner vers des organisations hôtes internationales couvrant au moins ces régions du monde et universellement reconnues pour leurs contributions de grande qualité au développement du secteur des transports routiers.

Deux organisations remplissant ces conditions viennent immédiatement à l'esprit.

L'une est le Centre conjoint FIT de recherche sur les transports de l'OCDE et du Forum International de Transport devenu une institution de dimension internationale, dotée d'une grande visibilité et d'une grande autorité.

L'autre est l'Association mondiale de la route (AIPCR), étroitement liée aux administrations routières de 107 pays développés et en développement, et possédant des membres parmi les parties prenantes du secteur routier dans un nombre encore plus élevé de pays. L'AIPCR n'inclut pas la recherche parmi ses principaux objectifs ; néanmoins, elle soutient et mène des études, à travers ses comités techniques, notamment dans les domaines de la sécurité des tunnels et de l'interaction route-véhicule.

Recommandation

Étant donné que les phases I et II du projet sur les chaussées à longue durée de vie ont été liées au CCRT, le groupe de travail actuel préfère recommander que le CCRT assume le rôle d'organisation hôte pour une éventuelle phase III, en respectant la condition selon laquelle les conséquences sur les ressources du CCRT doivent rester négligeables.

10. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

10.1 Contexte

Les « chaussées à longue durée de vie » ont beaucoup à offrir sur les routes à forte circulation où les travaux sont de plus en plus limités et indésirables en raison de leurs impacts sur la circulation et les temps d'attente des 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.

Il a été démontré que les couches sous-jacentes des chaussées pouvaient atteindre les objectifs de longévité qui viennent d'être décrits. En revanche, la couche de surface ou couche de roulement, déterminante pour la sécurité et le confort de conduite, reste le talon d'Achille du concept de chaussée à longue durée de vie. Cette mince couche de chaussée superficielle est, plus que toute autre partie de la structure, exposée à l'air, au soleil et aux précipitations, ainsi qu'à l'usure, aux contraintes et à la déformation liées au trafic qu'elle supporte.

10.2 Rapport de phase I

Le rapport de phase I a étudié la viabilité économique des revêtements à longue durée de vie et a identifié les éventuels matériaux candidats.

10.2.1 Résultats de 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. .../... »

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.

10.3 Travaux de phase II - Conclusions

Le présent rapport décrit et analyse les résultats de cette initiative majeure de recherche coordonnée, impliquant le personnel et les installations de recherche de 8 pays (Allemagne, Australie, Danemark, États-Unis, France, Nouvelle Zélande, Royaume Uni et Ukraine), ainsi que les commentaires et les recommandations de 10 autres pays (voir annexe B). La version provisoire du rapport final a été relue par des réviseurs externes du Canada et de la Finlande. Cette recherche a été lancée après les conclusions favorables de l'analyse économique de phase I.

Les travaux de phase II visaient à renforcer nos connaissances actuelles sur le potentiel et les limitations des deux matériaux candidats prometteurs (bitume-époxy et enduit hydraulique fibré gravillonné). 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.

Les deux sections suivantes présentent les résultats des essais en laboratoire et des évaluations sur les performances et la pertinence du bitume-époxy et de l'enduit hydraulique fibré gravillonné pour des revêtements avancés, à longue durée de vie. Les dernières sections établissent les conclusions résumées et les recommandations.

10.4 Bitume-époxy

Le bitume-époxy est 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 les bitumes 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.

Par rapport au bitume-époxy à base d'acide, les bitumes époxy amine et à base d'amine, à prise rapide, ont été quelque peu problématiques, car ils prenaient trop rapidement pour permettre un compactage approprié dans les conditions de prise et de durcissement fixées. Les éprouvettes

compactées ont donc présenté une teneur en vides plus élevée. En conséquence, les époxy à durcissement rapide nécessiteront un réglage du fonctionnement de la centrale d'enrobage traditionnelle et, peut-être, une mise en œuvre à plus grande proximité du site de production.

10.4.1 Principales conclusions des essais de phase II

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 :

- 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 de contrôle, 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.

10.4.2 Conclusions sur les performances attendues

Les performances attendues concernant la longévité et la durabilité des revêtements en 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 devrait 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.

10.4.3 Questions relatives aux recherches et essais ultérieurs

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 prévue. 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.

10.4.4 Questions de construction

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, la section d'essai utilisée en Nouvelle-Zélande a été construite avec du bitume-époxy fabriqué dans une centrale d'enrobage continue 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.

10.5 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. L'objectif était d'évaluer les possibilités d'utilisation en couche de roulement ultra-mince.

Le revêtement d'EHFG étudié est constitué d'une 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 concevoir 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, résistance au gel-dégel et aux attaques à l'acide, comportement en fissuration, adhésion du mortier de béton avec le support bitumineux.

De manière générale, l'épaisseur de la couche en béton fibré a dû être 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 retraithydraulique 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.

10.5.1 Principales conclusions des essais de phase II

Le programme d'essai 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.
- 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 présenteront 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 élevée. 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.

10.5.2 Conclusions sur les performances attendues

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 enclassement 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 effectués en phase II, en même temps que l'étude de formulation de l'Ehfg, montrent que les incertitudes actuelles sur les applications de l'Ehfg 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'Ehfg 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.

10.5.3 Questions relatives aux recherches et essais ultérieurs

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'Ehfg.* 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.

10.5.4 Questions relatives à la construction

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. 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 enchâssement des gravillons, ainsi qu'une surface de roulement plane et unie.

10.6 Conclusions résumées du projet

Le projet reflète les préoccupations des maîtres d'ouvrage, suscitées par une innovation lente et limitée dans les techniques de chaussées, par rapport à d'autres techniques de matériaux importantes.

Au vu des vastes travaux réalisés, il a été conclu que les deux matériaux, le bitume-époxy et l'enduit hydraulique fibré gravillonné, renforcé de fibres d'acier, pourraient très probablement apporter des solutions durables à la demande de revêtements pour des chaussées nouvelles ou existantes, si celles-ci possèdent une longue durée de vie résiduelle.

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.

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.

10.6.1 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).

Il convient de garder à l'esprit que 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 granulats 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 10.1.

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. Cette incertitude demeurera jusqu'à la fabrication et la mise en œuvre de quantités plus importantes.

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 l'endroit.

Comparaison des coûts indicatifs

Le Tableau 10.3 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.

Les estimations figurant dans le tableau 10.1 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.

Tableau 10.1. **Comparaison des coûts indicatifs entre matériaux**

Coûts d'un revêtement courant en EUR/m² (Europe de l'Ouest)			
Description	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.		

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 10.1 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.

10.7 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, réalisés sur différentes installations.

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, dans laquelle les matériaux seront testés à plus 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 constituent logiquement la phase suivante. 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.

10.7.1 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.

10.7.2 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 au 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.

10.7.3 Objectifs spécifiques des essais de phase III sur l'enduit hydraulique fibré gravillonné

Les objectifs des essais spécifiques sur l'enduit hydraulique fibré gravillonné sont variés : utilisation des matériaux disponibles localement, par opposition aux matériaux d'un même fournisseur, développement de techniques de mise en œuvre du mortier et d'insertion des gravillons, essai sur

plusieurs couches de base bitumineuses et différents mélanges d'un rapport eau/ciment variant entre 0.20 et 0.30, pour obtenir le meilleur équilibre entre malaxage/transport/mise en œuvre et performances du matériau durci.

10.7.4 Essais de terrain proposés en phase III : résumé des recommandations

Les essais de terrain sont recommandés pour tester les nouveaux matériaux de revêtements en conditions réelles de trafic et d'environnement, favoriser l'amélioration des techniques de fabrication et de mise en œuvre, ainsi que le développement d'un nouvel équipement, si nécessaire, et privilégier le contrôle qualité.

Les principales recommandations sont les suivantes

- Que les administrations routières intéressées soient invitées à manifester auprès du secrétariat du CCRT leur souhait de participer aux essais proposés dès que possible après la publication du présent rapport et dans un délai maximal d'un an.
- Qu'une réunion préparatoire soit convoquée par l'organisation hôte, lorsqu'un minimum de trois offres d'essais sur l'un quelconque des matériaux ont été reçues. Cette réunion préparatoire doit désigner un coordinateur de projet et convenir des principaux programmes et principes de gestion des essais.
- Que les participants commencent les essais à la date qui leur convient, après la réunion préparatoire, et au plus tard en mai 2009. Les essais doivent durer au moins deux ans et être terminés au plus tard en mai 2011.
- Que les participants soient prêts à remettre leur rapport final dans les trois mois suivant la fin des essais, et au plus tard en juillet 2011. Les deux rapports consolidés, un pour chaque type de matériau, doivent être rédigés par les coordinateurs pour les deux séries d'essais. Les réunions finales doivent permettre de réviser et de valider les versions finales des rapports.

Les recommandations annexes sont les suivantes :

- Que le CCRT assume le rôle d'organisation hôte et la responsabilité de convoquer les réunions des participants pendant cette phase d'essais sur le terrain.
- Que la responsabilité du financement et de la gestion des essais sur le terrain, ainsi que de l'enregistrement et de la diffusion des résultats incombe aux organisations de parrainage, aux participants et aux coordinateurs de projet.

NOTES

1. Remarque : les coûts habituels des travaux routiers mentionnés dans les conclusions du rapport de phase I sont indiqués en dollars américains et prennent en compte les cours du change en vigueur à la date de rédaction du rapport de phase I.

APPENDICE A

(RELATIF AU CHAPITRE 4)

A.1. Historique de performances enregistrées en laboratoire et sur le terrain pour les matériaux de référence Américains et Néo-Zélandais

A.1.1 *Matériau de référence employé par le Centre de recherche routière Turner Fairbank (TFHRC)*

Pendant l'été et l'automne 2002, la Federal Highway Administration (FHWA) a construit, en partenariat avec 16 directions des routes d'État et plus de 30 groupes industriels, douze sections d'essais en vraie grandeur, avec différents liants bitumineux modifiés, au centre d'essai de chaussées de McLean, Virginie. Les douze sections ont été soumises à une charge, dans deux installations de chargement accéléré de la FHWA, afin d'évaluer la réponse à la déformation permanente (orniérage) et à la fissuration par fatigue. Les résultats sont reliés à une vaste étude en laboratoire de caractérisation rhéologique, physiochimique et de formulation du liant.

La configuration des voies, ainsi que la liste des matériaux évalués sont indiquées sur la Figure A.1.1. Une recette a été soumise par le maître d'œuvre concernant un enrobé Superpave avec liant bitumineux CP 70-22 non modifié et pour principale granulométrie 12.5 mm (grosseur nominale maximale du granulat). La teneur en liant bitumineux optimale était de 5.3 % pour la masse totale de l'enrobé, basée sur une teneur en vides de conception de 4.0 % à 75 girations. Bien que des formulations avec d'autres liants aient suggéré une teneur en liant légèrement supérieure, les objectifs pour tous les enrobés, excepté le CG-AZ, ont également été fixés à 5.3 %.

A.1.2 *Enrobé BBDR de référence employé lors des travaux néo-zélandais*

Une taille de granulat standard, conforme à la spécification P11 de Transit New Zealand (TNZ) pour le BBDR, a été utilisée pour les enrobés époxy et de contrôle (voir tableau A.1.1). La teneur en bitume était de 4.7 %. Le compactage des éprouvettes cylindriques de 100 mm de diamètre a été effectué au moyen d'une presse à cisaillement giratoire, pour obtenir une teneur en vides de 20.4 ± 1.2 % (limites de confiance de 95 %) sur tous les éprouvettes utilisées lors de l'étude. Ce type d'enrobé, généralement fabriqué avec un bitume de classe de pénétrabilité 80-100 ou 60-70, a une durée de service normale en Nouvelle-Zélande de 10-11 ans et se rompt habituellement par fragilisation et plumage dus à l'oxydation du liant.

Figure A.1.1. Configuration des 12 voies de chaussée construites (sans échelle)

Voie 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CG-AZ	CP 70-22	Oxydé	SBS GL	CG-MT	Terpoly mère	Fibré	CP 70-22	SBS 64-40	Oxydé	SBS GL	Terpoly mère
CP 70-22											
Enlèvement de 100 mm de la couche de granulat concassé existante		100 mm de nouvelle couche de granulat concassé n° 21A sous les douze voies									
				Enlèvement de 50 mm de la couche de granulat concassé existante							
Couche de granulat concassé existante n° 21A du département des Transports de Virginie (grosseur nominale maximale du granulat : 25 mm)											
Épaisseur de la base de la couche de granulat concassé à la surface de la chaussée : 660 mm											
Sol de fondation recompressé AA SHT O A-4											

Légendes :

- CP 70-22 = Liant bitumineux non modifié de contrôle (température intermédiaire TIS = 26.1° C)
 CG-AZ = Liant bitumineux en caoutchouc granulaire, procédure humide, Ministère des Transports d'Arizona
 CG-MT = Liant bitumineux en caoutchouc granulaire, malaxé sur site (TIS = 17.9° C)
 Terpolymère = Liant bitumineux modifié au terpolymère d'éthylène (TIS = 14.3° C)
 SBS GL = Liant bitumineux modifié au styrène-butadiène-styrène avec greffe linéaire (TIS = 18.1° C)
 SBS 64-40 = Liant bitumineux modifié au styrène-butadiène-styrène CP 64-40 (TIS = 8.6° C)
 Oxydé = Liant bitumineux oxydé (TIS = 22.6° C)
 Fibré = Liant bitumineux non modifié CP 70-22 avec 0.2 % de fibres de polyester par masse de granulat

Source : *La Federal Highway Administration (FHWA) (United States)*

Tableau A.1.1. Granulométrie des granulats utilisés dans les enrobés époxy et de contrôle

Taille de tamis [mm]	13.2	9.5	6.7	4.75	2.36	0.60	0.075
Passants [%]	100	98	66	36	25	13	6.3

Note : teneur de liant de 4.7 %.

A.2. Recommandations du fabricant concernant les bitumes époxy acide

Recommandations de Chemco Systems

Chemco Systems¹ (États-Unis) donne les recommandations suivantes concernant les bitumes époxy acide :

Les bitumes locaux peuvent-ils être utilisés dans le bitume-époxy ?

Le bitume-époxy est formulé avec un mélange de matériaux provenant d'un champ pétrolier américain. Le bitume dérivé de ce brut a des propriétés exceptionnelles qui le rendent compatible avec les résines époxy et les agents de réticulation constituant l'ensemble du liant et assurant un équilibre entre la durée de service, la durée de polymérisation, la résistance et la souplesse du système. D'autres bitumes ne possèdent pas ces propriétés et la plupart ne sont pas compatibles avec la résine époxy et les agents de réticulation.

Quelles sont les exigences de durée et de température pour le mélange de béton bitumineux époxy ?

Avant le mélange, le composant résine époxy est maintenu à une température de 80-85° C et le composant bitume / agent de réticulation, à 150-155° C. La température du granulat est contrôlée à environ 113-124° C. À la sortie du pétrin (cuve de malaxage de la centrale d'enrobage), la gâchée est contrôlée et doit avoir une température comprise entre 110° et 121° C.

Quelles sont les propriétés optimales du granulat pour le bitume-époxy ?

Étant donné que les granulats constituent 94 % de l'enrobé, il est essentiel d'utiliser les meilleurs granulats disponibles, afin d'obtenir une chaussée durable ayant une bonne durée de vie en flexion. Les granulats doivent être durs, solides, résistants à l'usure et au polissage et avoir 100 % de faces concassées. Les particules allongées dont le rapport largeur-hauteur est supérieur à 1 sur 3 ne doivent pas représenter plus de 5 % du poids total des particules de granulat.

La granulométrie typique d'un revêtement de 25 mm d'épaisseur est la suivante :

Taille de tamis		Passants [%]
Pouces	mm	
3/4	19.0	100
1/2	12.5	95-100
3/8	9.5	80-95
N° 4	4.75	58-75
N° 30	0.0006	20-35
N° 200	0.000075	7-14

1. Pour en savoir plus, consultez le site Web de Chemco Systems : http://www.chemcosystems.com/epoxy_faqs.html.

A.3. Méthodes d'évaluation des caractéristiques de prise

Différentes méthodes d'évaluation des caractéristiques de prise des liants bitume-époxy sont indiquées au Tableau A.3.1.

Tableau A.3.1. Méthodes d'évaluation des caractéristiques de prise des liants bitume-époxy

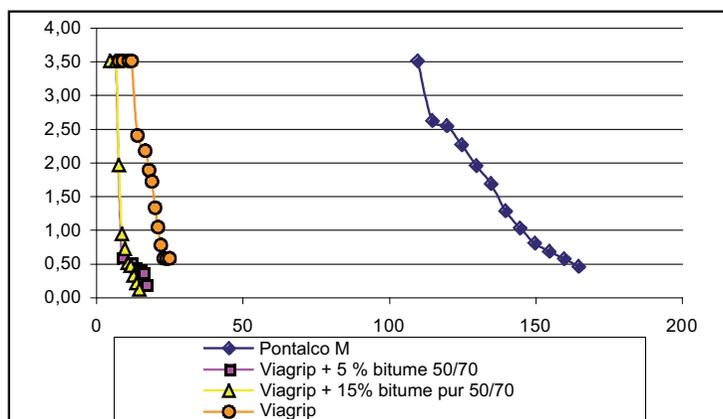
Laboratoire	Méthode	Propriété mesurée
France	Calorimétrie différentielle à balayage	Enthalpie de réaction (degré de polymérisation)
	Essai de pénétration	Indice de pénétration
États-Unis	Rhéomètre à cisaillement dynamique	Rhéologie des poutres de bitume-époxy
	Essai d'arrachement	Force de cohésion d'une pellicule de bitume-époxy

Sur les quatre méthodes, l'essai de pénétration empirique est le moyen le plus indiqué pour évaluer le commencement de la polymérisation. Les résultats de l'essai de pénétration sur les deux différents systèmes époxy sont illustrés sur la Figure A.3.1.

Il s'avère que le liant Viagrip a une durée de prise très courte, de l'ordre de quelques minutes. L'agent de réticulation est une amine, avec laquelle le matériau réagit beaucoup plus vite que l'époxy Pontalco M, mélangé à un agent de réticulation à base d'acide.

Des durées de polymérisation aussi courtes n'assurent pas une application pratique dans les centrales d'enrobage traditionnelles, ni même une bonne maniabilité de l'enrobé non compacté.

Figure A.3.1. Évaluation des caractéristiques de prise par l'essai de pénétration
Pénétration (axe des ordonnées) / Durée de polymérisation [heures] (axe des abscisses)



Source : Nelly Vulcano-Greullet, LRPC Autun.

Les autres méthodes sont plus fondamentales et fournissent des informations sur l'état de polymérisation. La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) a permis de surveiller l'évolution thermique, liée à la polymérisation de l'époxy.

La durée de polymérisation a été estimée au moment où le matériau atteint 30 % de polymérisation. Le rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) a permis d'évaluer les poutres de bitume-époxy polymérisé. Les résultats sont commentés à la section 4.3.2.

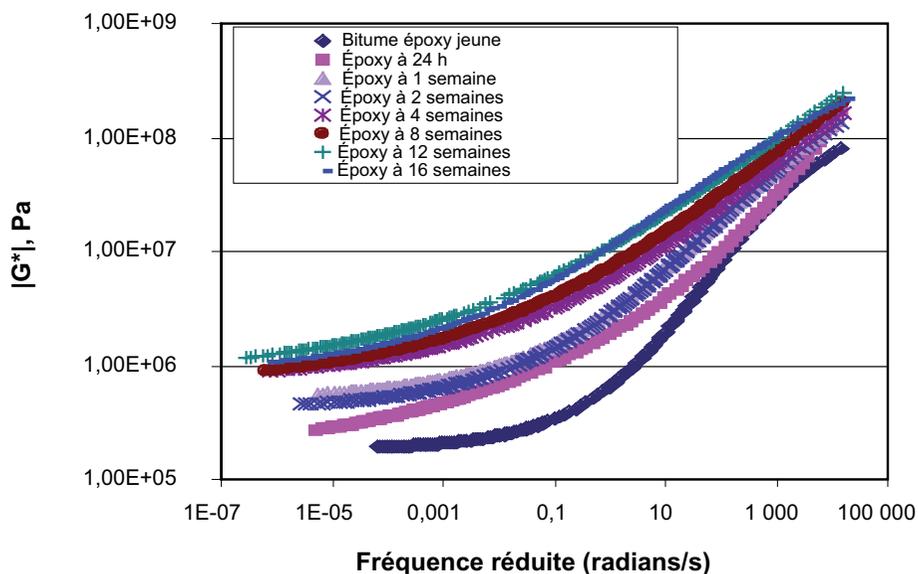
L'essai d'arrachement a permis de mesurer les forces de cohésion des pellicules de bitume-époxy, afin de fournir des informations sur l'évolution de la polymérisation du système bitume-époxy. Les résultats sont similaires à ceux de Scott Wilson.

De manière générale, les forces de cohésion se sont avérées sensiblement supérieures à celles du liant traditionnel et du liant modifié au polymère.

A.4. Propriétés rhéologiques du liant à différentes étapes de vieillissement

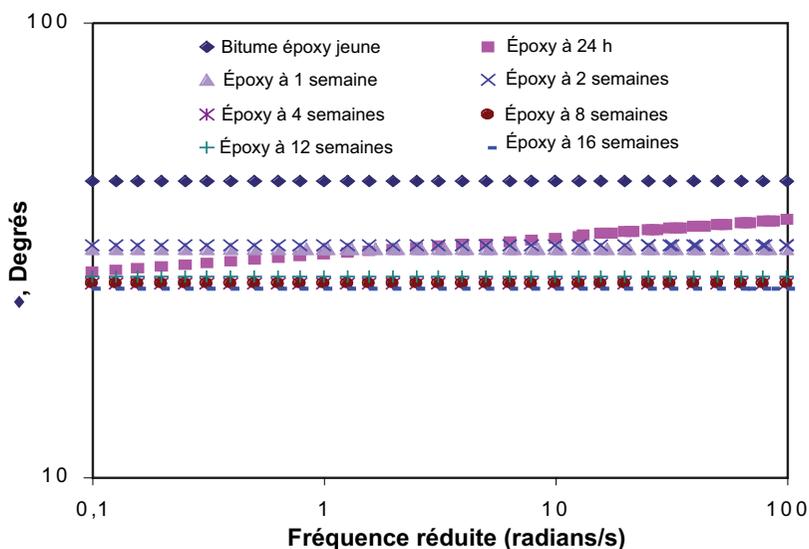
Les changements survenant dans les trois paramètres rhéologiques (module complexe $|G^*|$, angle de phase δ et paramètre Superpave $|G^*| / \sin\delta$) à différentes étapes de vieillissement (voir section 4.3.3) sont illustrés respectivement sur les Figures A.4.1, A.4.2 et A.4.3.

Figure A.4.1. Courbe maîtresse du module complexe ($|G^*|$) en fonction de la fréquence réduite, à une température de référence de 28° C, pour différentes durées de vieillissement aux UV du bitume-époxy



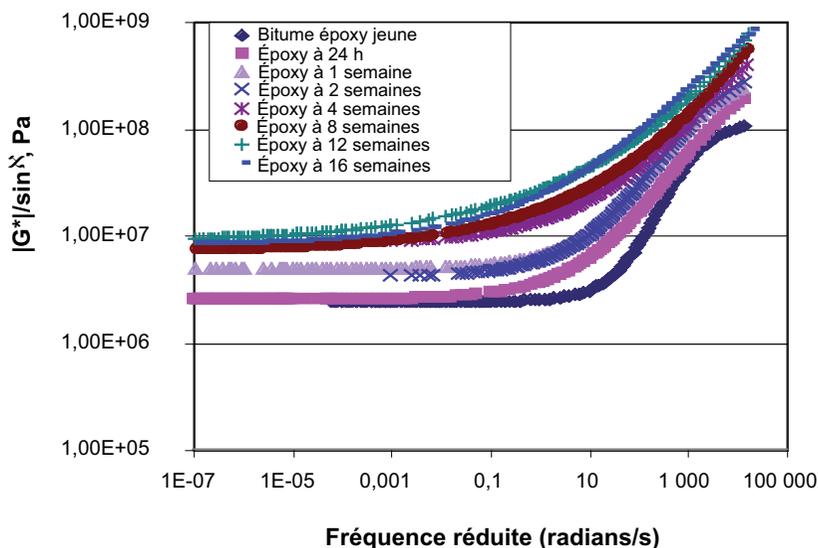
Source : Materials and Construction Team, Turner-Fairbank Research Center (États-Unis).

Figure A.4.2. Courbe maîtresse de l'angle de phase (δ) en fonction de la fréquence réduite, à une température de référence de 28° C, pour différentes durées de vieillissement aux UV du bitume-époxy



Source : Materials and Construction Team, Turner-Fairbank Research Center (États-Unis).

Figure A.4.3. Courbe maîtresse du paramètre Superpave $|G^*|/\sin \delta$ en fonction de la fréquence réduite, à une température de référence de 28° C, pour différentes durées de vieillissement aux UV du bitume-époxy



Source : Materials and Construction Team, Turner-Fairbank Research Center (États-Unis).

Dans un délai équivalent à trois fois cette durée de vieillissement, il se produit un changement majeur et reconnaissable dans les propriétés du matériau. Le premier changement a lieu au bout d'une semaine de vieillissement, correspondant très probablement à la fin de la polymérisation, ce qui est conforme aux durées de polymérisation observées à 85° C (voir section 4.4.2).

Au bout de deux semaines de vieillissement, aucun changement nouveau n'apparaît pas sur l'époxy ; le prochain changement radical a lieu au bout de quatre semaines de conditionnement aux UV. Ensuite, l'époxy n'évolue guère pendant le reste des 16 semaines de conditionnement aux UV (ce qui correspond à plus de 30 ans d'exposition en Floride, États-Unis).

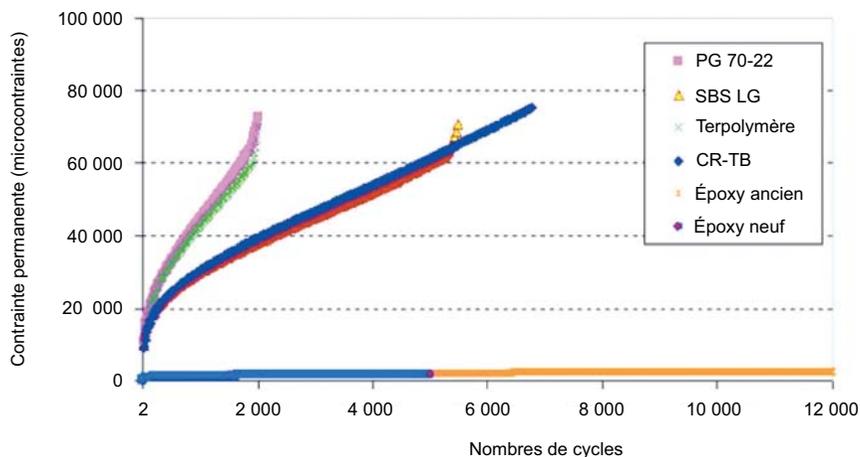
A.5. Propriétés de l'enrobé

A.5.1 Résistance à la déformation

Le protocole d'essai de performance simple pour l'essai d'indice d'écoulement [6] a été réalisé à 64° C sur le bitume-époxy et différents enrobés bitumineux de référence. Il consiste à appliquer des charges répétées d'un demi-sinus versé, en alternance avec des périodes de repos. Il est conçu par définition pour caractériser les propriétés viscoélastiques de l'enrobé, afin de réaliser une évaluation de la résistance à l'orniérage. Les résultats, c'est-à-dire la déformation permanente cumulée en fonction des cycles de chargement, sont illustrés sur la Figure A.5.1.

Les enrobés de référence subissent des déformations permanentes beaucoup plus élevées que les enrobés de bitume-époxy. La figure montre également les différences sensibles entre les enrobés non modifiés (CP 70-22) et les enrobés modifiés (CG-MT et GL) [17], ainsi qu'entre les enrobés modifiés et les enrobés de bitume-époxy.

Figure A.5.1. Déformations permanentes cumulées en fonction des cycles de chargement, pour les enrobés de référence et bitume-époxy, selon l'indice d'écoulement de l'essai de performance simple

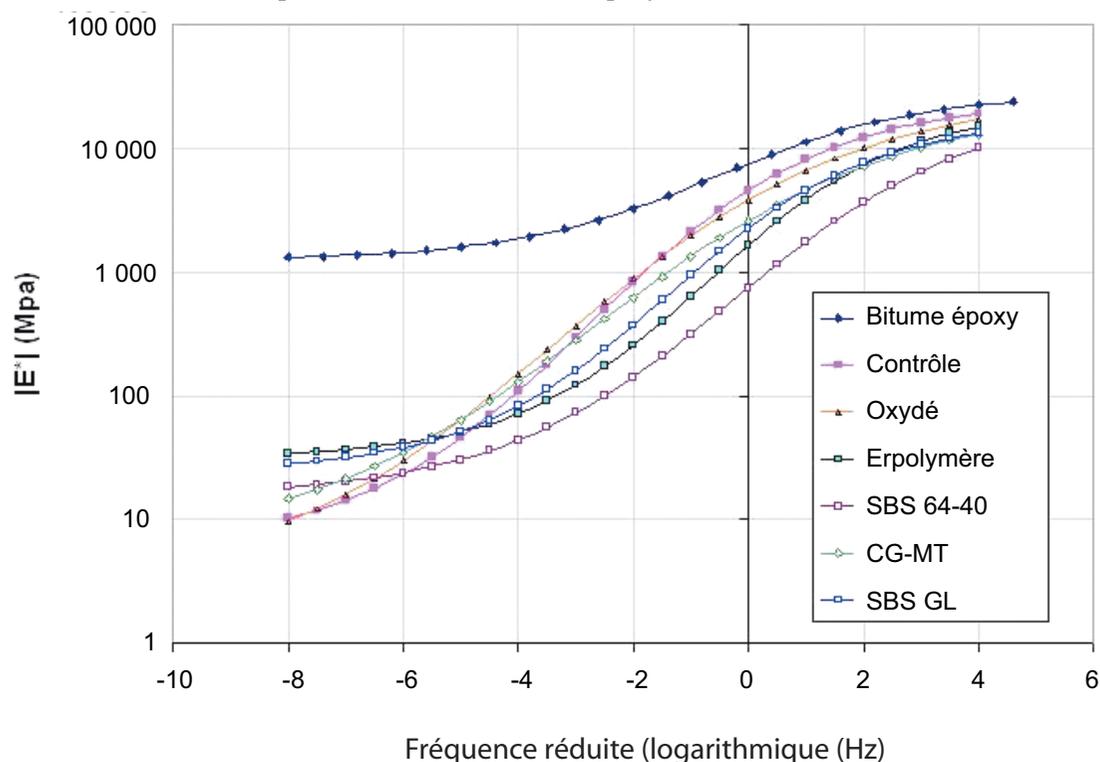


Source : Materials and Construction Team, Turner-Fairbank Research Center (États-Unis).

Un deuxième type de protocole d'essai de performance simple pour le module dynamique (E^*) a été réalisé sur les enrobés de référence et bitume-époxy. Cette fois, l'essai a été mené avec plusieurs températures et fréquences.

Comme le montrent les courbes maîtresses de la Figure A.5.2, le bitume-époxy est sensiblement plus rigide à toutes les températures et fréquences. En conséquence, l'orniérage devrait être négligeable. Il convient cependant d'être prudent lorsqu'on utilise ces propriétés dans des modèles empiriques mécanistes, comme ceux prévus dans la méthode NCHRP 1-37A [3].

Figure A.5.2. Comparaison du module dynamique ($|E^*|$), pour les enrobés de bitume-époxy et de référence



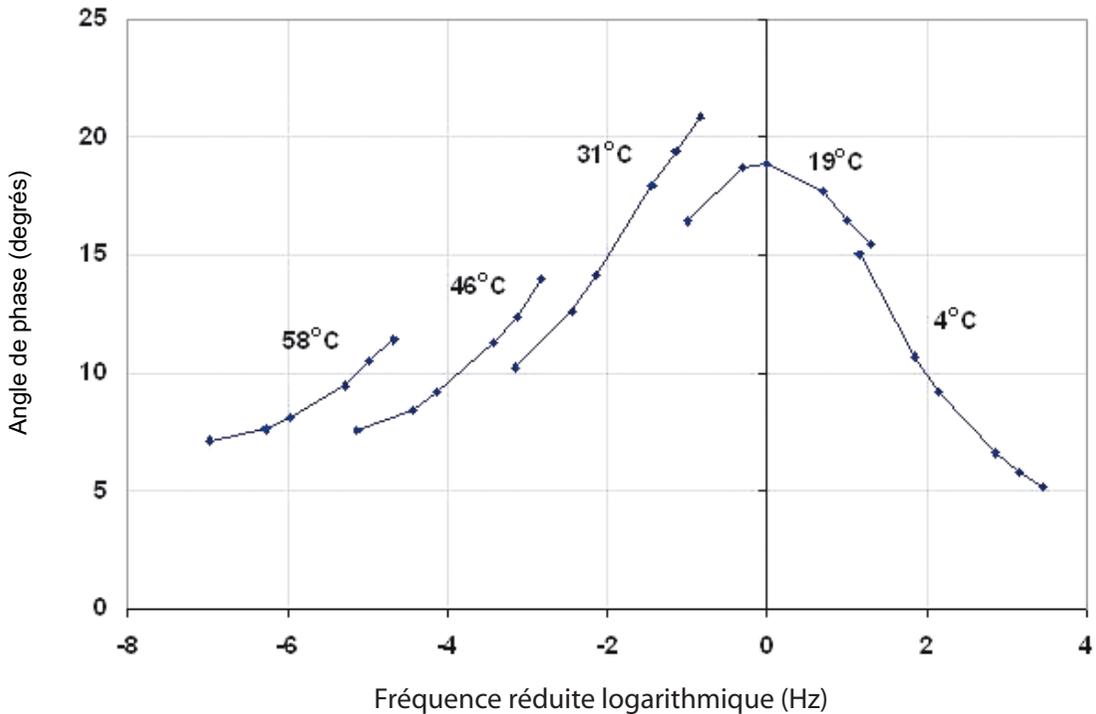
Source : Materials and Construction Team, Turner-Fairbank Research Center (États-Unis).

Le module dynamique est conforme au concept de superposition temps-température, mais ce n'est pas le cas d'une autre propriété viscoélastique fondamentale, l'angle de phase, comme le montre la Figure A.5.3. Ce résultat indique un degré de réticulation de la matrice polymère de l'époxy. Il a peu de conséquences sur la prédiction de la dégradation secondaire ou de l'orniérage. Cependant, toutes caractérisations et prédictions viscoélastiques avancées du matériau sous différentes températures dépendront du module de relaxation viscoélastique inhérent.

Après de nombreux essais sur l'endommagement par fatigue du mastic et de différents liants, Kim *et al.* [10] ont découvert que la pente de la courbe maîtresse du module viscoélastique était étroitement associée ($R^2 = 0.82$) à une propriété du matériau liée à la vitesse de fissuration viscoélastique et au taux de restitution d'énergie.

La pente maximale de la courbe maîtresse du module dynamique (dans un repère log-log) indique donc indirectement que les enrobés de bitume-époxy pourraient être moins sensibles au développement de l'endommagement et de la rupture que les mélanges de bétons bitumineux traditionnels, non modifiés ou modifiés.

Figure A.5.3. Angle de phase du module dynamique ($|E^*|$) de l'enrobé de bitume-époxy



Source : Materials and Construction Team, Turner-Fairbank Research Center (États-Unis).

A.5.2 Endommagement par l'humidité

Deux tests de torture évaluant l'endommagement par l'humidité ont été réalisés pour évaluer la sensibilité du BB époxy. L'orniérage induit par le test d'orniérage en conditions humides, sur 40 000 passages à 64° C, a été inférieur à 2 mm. Ces conditions étaient plus sévères (20 000 passages et 6° C de plus) que les essais habituels [20, 14]. L'orniérage induit par le deuxième essai, à l'orniéreur de Pine Instrument Company, sur 40 000 passages à 60° C, a été inférieur à 1 mm. Les degrés constatés d'orniérage et d'endommagement par l'humidité ont été négligeables.

Il peut être conclu que les dommages liés à l'arrachement et à l'orniérage sur un béton bitumineux époxy suscitent peu d'inquiétude, bien qu'une confirmation soit nécessaire avec d'autres types et granulométries de granulat.

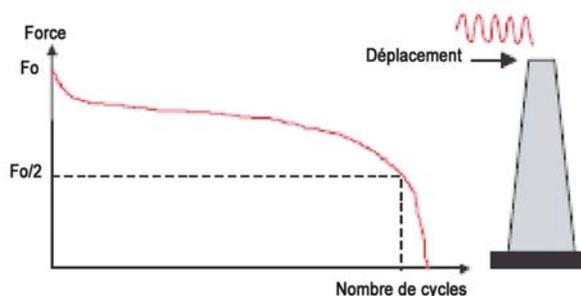
A.5.3 Fatigue

A.5.3.1 Principe de l'essai de fatigue français

L'objectif des essais de fatigue sur les enrobés est de comparer les valeurs de déformations en traction par flexion, calculées à la base des couches d'enrobé, avec les valeurs de déformations

maximales supportées par une éprouvette d'enrobé en laboratoire lors d'un essai de fatigue. En France, la caractérisation en laboratoire est réalisée par un essai de flexion deux points, sur une éprouvette trapézoïdale d'enrobé bitumineux sollicitée en tête par un déplacement sinusoïdal continu. L'éprouvette est fixée à la base sur une pièce d'acier par la résine époxy, comme le montre la figure A.5.4. L'éprouvette est considérée comme rompue lorsque sa force de réaction en tête a été divisée par deux.

Figure A.5.4. Principe de l'essai à déplacement sinusoïdal



Source : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées ((LCPC) (France).

L'essai de fatigue en laboratoire permet de déterminer la déformation ϵ_6 conduisant à la rupture d'une éprouvette par fatigue sous certaines conditions d'essai (fréquence et température), après 1 million de chargements. Son résultat est à la base du dimensionnement des chaussées bitumineuses en France. Il est donc de toute première importance de disposer d'un essai de fatigue pertinent vis-à-vis du comportement réel sur chaussée.

L'essai de fatigue sur éprouvette trapézoïdale a été réalisé sur un BBSG fabriqué avec des liants bitumineux traditionnels et époxy. Les résultats figurant dans le Tableau A.5.1 sont indiqués en termes de ϵ_6 et de durée de vie, selon différents déplacements imposés.

Tableau A.5.1. Comparaison de la durée de fatigue des enrobés bitumineux traditionnels et époxy

Échantillon	Durée de vie (valeur moyenne)				ϵ_6
	150	170	203	250	
Niveau de déplacement (μm)					
BBSG 0/10 – Bitume-époxy	-	-	11 436 000	2 856 000	267
BBSG 0/10 – CP 10/20	1 031				
	40	457	250	-	147
	0	500	200		

La durée de vie obtenue pour l'enrobé BBSG avec bitume-époxy indique que ce dernier est supérieur à l'enrobé bitumineux traditionnel. Toutefois, la durée de vie en fatigue nettement plus longue du bitume-époxy par rapport à l'enrobé traditionnel n'est pas nécessairement corrélée à une durée de vie en fatigue nettement plus longue sur le terrain. Elle nécessite qu'un ou plusieurs essais en laboratoire plus pertinents soient réalisés pour confirmer ce comportement en fatigue amélioré. Plusieurs de ces essais sont commentés à la section suivante.

A.5.3.2 De la fatigue à l'amorçage de la rupture

Une charge cyclique inversée en traction-compression directe axiale peut permettre d'évaluer la sensibilité de l'enrobé bitumineux à l'endommagement par la fatigue (voir Figure A.5.5). Ces essais ont été réalisés à 19° C sur des éprouvettes cylindriques d'une hauteur de 150 mm et d'un diamètre de 71 mm, dotée de prises spécialement conçues, avec une caractérisation de la déformation très similaire dans son esprit à celle avancée par d'autres chercheurs [7].

Dans les premières phases de caractérisation de la fatigue entrant dans le cadre du programme de recherche à l'aide de l'installation de chargement accéléré de la FHWA, ces essais comparatifs ont été réalisés sur le bitume-époxy et sur l'enrobé de caoutchouc granulaire (CG-MT) malaxé sur site. Ces essais particuliers consistent à appliquer une déformation prescrite d'un plateau à l'autre, contrôlée par un vérin. Trois LVDT externes sont collés avec un écart de 120 degrés sur le bord extérieur de l'échantillon avec la longueur de référence à mi-hauteur des éprouvettes. La longueur de référence est égale au diamètre de l'échantillon, soit 75 mm.

La fonction des LVDT externes est de mesurer la déformation d'une manière « sur éprouvette » plus appropriée, afin que la déformation sur la partie centrale de l'échantillon ne soit pas influencée par les effets latéraux liés aux bords retenus par leur adhésion aux plateaux. Les enrobés bitumineux CG-MT et bitume-époxy ont été contrôlés à un niveau de déformation plateau à plateau d'environ 1 300 microdéformations.

Figure A.5.5. Configuration de l'essai de fatigue en traction-compression axiale



Source : Materials and Construction Team, Turner-Fairbank Research Center (États-Unis).

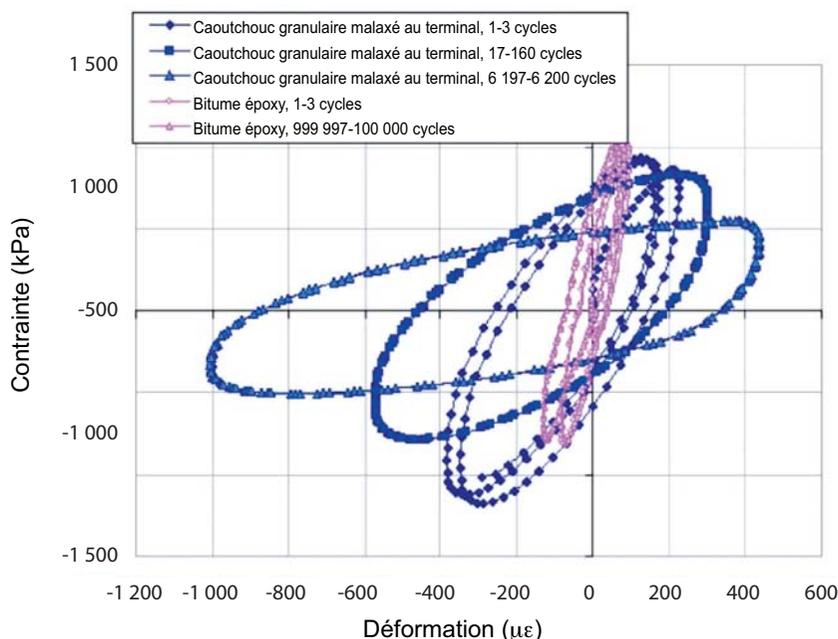
L'objectif était d'obtenir, pour les deux enrobés, une déformation sur éprouvette de 1 000 microdéformations, correspondant au niveau moyen de déformation en traction transversale et longitudinale observé à la base de la couche de béton bitumineux, dans l'installation de chargement accéléré. L'enrobé CG-MT a obtenu un niveau de déformation sur éprouvette d'environ 1 000 microdéformations et sa rupture a été induite à environ 6 200 cycles de chargement, à la fin de l'essai. Les éprouvettes de bitume-époxy ont obtenu environ 250 microdéformations au centre, où sont fixés les LVDT, et de 1 300 microdéformations aux plateaux. Le cycle d'hystérésis de fatigue en traction-compression pour les enrobés CG-MT et bitume-époxy est illustré sur la Figure A.5.6.

Le CG-MT subit quelque dégradation par fatigue à 6 200 cycles de chargement, comme le montrent les changements dans le cycle d'hystérésis, au cours de l'essai. Par ailleurs, le cycle d'hystérésis de l'enrobé époxy à 100 000 cycles de chargement est identique à celui observé au début de l'essai de fatigue, comme le montre la Figure A.5.7. Ce résultat indique que l'enrobé époxy ne présente aucune dégradation par fatigue. Une diminution négligeable de la contrainte a été observée à 100 000 cycles de chargement. Ce résultat indique qu'une déformation significative est tolérée par le bitume-époxy. Cependant, il est difficile de faire des estimations sur les propriétés de fatigue de l'enrobé de bitume-époxy en comparant avec les résultats en laboratoire du CG-MT ou avec son comportement en fissuration par fatigue dans l'installation de chargement accéléré.

La Figure A.5.8 montre la courbe de la longueur de fissuration cumulée en fonction du nombre de passage de roues dans l'installation de chargement accéléré, pour différents enrobés de référence [17]. Sur le plan qualitatif, l'enrobé de bitume-époxy devrait afficher un meilleur comportement en fatigue que les enrobés modifiés aux polymères, étant donné qu'aucun dommage ne peut être constaté sur l'enrobé après 100 000 cycles de chargement à 250 microdéformations, conditions dans lesquelles les enrobés bitumineux non époxy subissent habituellement des dommages, c'est-à-dire une diminution du module. Une caractérisation de fatigue beaucoup plus poussée se poursuit avec d'autres essais en laboratoire.

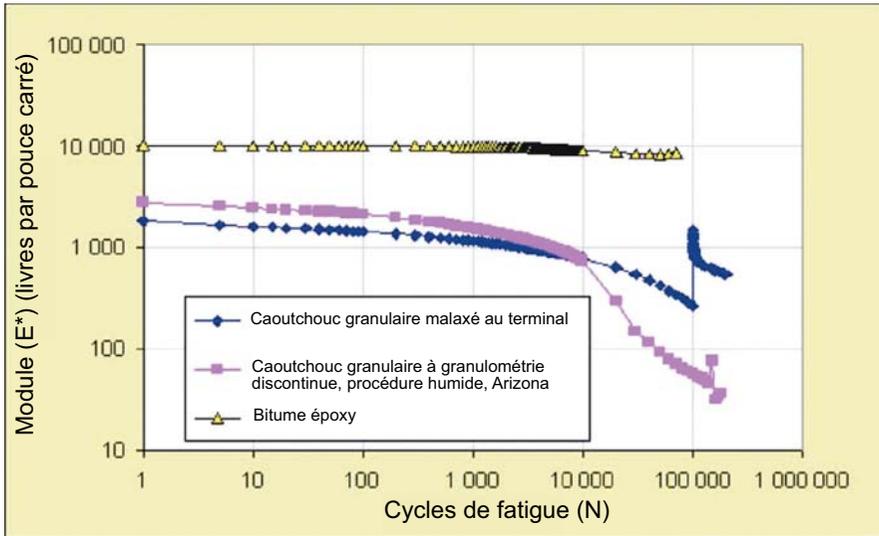
Les essais de résistance à la traction indirecte et du module réversible ont été réalisés sur les enrobés de référence (carottes extraites directement des voies soumises aux essais dans l'installation de chargement accéléré) et sur l'enrobé de bitume-époxy à 190° C. Les ratios d'énergie de rupture [18] sont l'objet de cette analyse. L'énergie de rupture de l'enrobé de bitume-époxy se maintient

Figure A.5.6. **Cycles d'hystérésis de fatigue des enrobés de bitume-époxy et caoutchouc granulaire malaxé sur site (même granulat et mêmes propriétés volumétriques)**



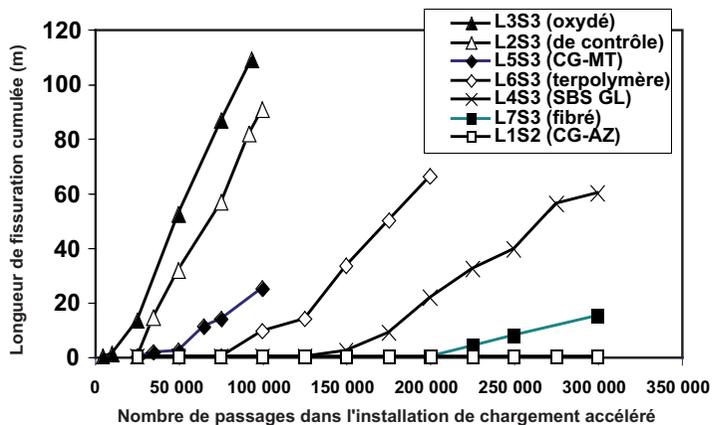
Source : Materials and Construction Team, Turner-Fairbank Research Center (États-Unis).

Figure A.5.7. Comparaison des résultats des essais de fatigue en traction-compression pour le bitume-époxy et les bitumes modifiés au caoutchouc granulaire



Source : Materials and Construction Team, Turner-Fairbank Research Center (États-Unis).

Figure A.5.8. Longueur de fissuration cumulée en fonction du nombre de passages dans l'installation de chargement accéléré



Source : Materials and Construction Team, Turner-Fairbank Research Center (États-Unis).

essentiellement jusqu'au point d'amorçage de la rupture. L'énergie totale est calculée sur l'ensemble de la zone couverte par la courbe contrainte-déformation. L'énergie de rupture est inférieure à l'énergie totale et est calculée sur la zone couverte par la courbe contrainte-déformation s'élevant jusqu'au point d'amorçage de la rupture, puis redescendant jusqu'à une contrainte nulle, le long d'une ligne sur la pente du module réversible de l'enrobé.

Alors que des valeurs de résistance situées entre 550 et 1 350 kPa ont été obtenues pour les enrobés de référence modifiés aux polymères, soumis aux essais dans l'installation de chargement accéléré, la résistance en traction de l'enrobé de bitume-époxy oxydé par chauffage a atteint la capacité de la machine d'essai (charge de 5 000 livres), avec une contrainte de 1 885 kPa sans rupture.

L'enrobé de bitume-époxy a atteint une déformation en traction maximale de l'ordre de 865 microdéformations, avant d'atteindre la capacité de charge de la machine, tandis que les enrobés de référence ont atteint le point de rupture entre 1 250 et 2 000 microdéformations. Ces résultats, conformes aux essais de fatigue axiale en traction-compression, indiquent que le bitume-époxy peut supporter des contraintes et des déformations plus élevées avant que la rupture ne se produise. Sur le plan qualitatif, ils laissent présager une durée de vie en fatigue et des propriétés de rupture bien meilleures que celles des enrobés bitumineux traditionnels, modifiés et non modifiés.

A.5.4 Essais de fissuration à basse température

Trois différents essais de caractérisation en laboratoire ont été réalisés sur l'enrobé de bitume-époxy.

- Essais de retrait thermique empêché.
- Essais de traction compacte.
- Essais de flexion semi-circulaire.

Les essais de retrait thermique empêché ont été réalisés sur l'enrobé de bitume-époxy selon AASHTO TP10-93 [2], afin de comprendre les performances du matériau dans des situations de refroidissement extrême soulevant le problème de la fissuration thermique à basse température. La vitesse de refroidissement a été fixée à 15° C/h. Les résultats montrent une température de rupture de -26° C, nettement inférieure à celle attendue selon les critères du liant Superpave qui, à partir des valeurs m et S , permettraient de classer le bitume-époxy jeune en CP x-10 (voir section 4.3.2).

Figure A.5.9. Échantillon et configuration de l'essai de traction compacte en disque



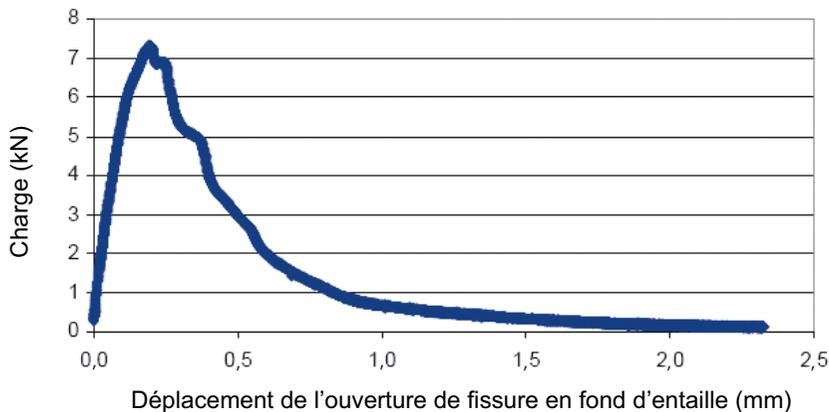
Source : Bill Buttlar, Université de l'Illinois.

L'essai de traction compacte en disque est basé sur les procédures d'essais de rupture des métaux. Il a été utilisé pour la première fois sur le bitume lors des travaux de Wagoner et Buttlar [22], ainsi que de Paulino, Wagoner et al. [23]. La figure A.5.9 montre une vue générale de la géométrie de l'éprouvette d'essai.

La rupture se produit sur l'entaille prédécoupée, lorsque l'échantillon se brise. La charge et le déplacement de l'ouverture de fissure en fond d'entaille sont mesurés. L'énergie de rupture calculée est la surface couverte par la courbe du déplacement de l'ouverture de fissure, divisée par la surface de la rupture.

Les essais ont été réalisés à différentes températures. Ils montrent généralement les effets des charges sur le déplacement de l'ouverture de fissure en fond d'entaille, illustrés sur la figure A.5.10.

Figure A.5.10. **Données typiques d'un essai de traction compacte en disque**



Source : Bill Buttlar, Université de l'Illinois.

Les essais sont résumés au Tableau A.5.2. Comme on peut le voir, l'énergie de rupture baisse avec la température. Les valeurs de l'énergie de rupture du bitume-époxy à -18°C ont été comparées à celles d'une section sur le terrain étudiée par Wagoner et al. [23]. Les enrobés avec liants CP 64-22, 58-28 et 58-34 utilisés dans les différentes sections ont présenté des énergies de rupture à -20°C d'environ 220 J/m^2 à 190 J/m^2 (CP 64-22), d'environ 305 J/m^2 (CP 58-22) et d'environ 305 J/m^2 à 350 J/m^2 (CP 58-34).

L'enrobé de bitume-époxy a présenté, à -18°C , des énergies de rupture de l'ordre de 610 J/m^2 , sensiblement plus élevées que les enrobés traditionnels, ce qui indique une résistance encore meilleure à la fissuration thermique à basse température. Une couche intermédiaire de marque déposée, à élasticité élevée et à haute teneur en liant, utilisée dans l'étude, a présenté une énergie de rupture de 1400 J/m^2 à -20°C , mais ne s'est pas réellement rompue à -10°C . En effet, aucune fissure ne s'est propagée, mais une fissuration distribuée plus faible ou un émoussement se sont produits avant l'entaille. Le même comportement a été observé sur le bitume-époxy à des températures relativement plus élevées. Les essais sont résumés au Tableau A.5.2.

Lorsque le bitume-époxy se brise véritablement, l'adhésion du granulat avec le liant bitume-époxy est très forte, comme l'indique l'inspection visuelle, permettant de constater une rupture du granulat avec un léger décollement du liant bitume-époxy de la surface nue des gravillons.

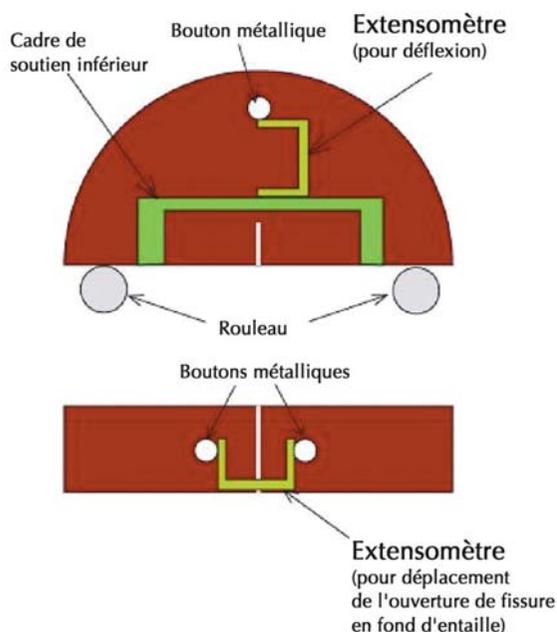
Tableau A.5.2. Résultats des essais de traction compacte sur enrobés de bitume-époxy (reproduits avec l'aimable autorisation de Bill Buttlar, Université de l'Illinois)

Température de l'essai (° C)	Énergie de rupture (J/m ²)	Charge maximale (kN)	Remarques
+ 19			Pas de rupture, aucune donnée recueillie.
+ 10	4 354.30	5.08	Déplacement de l'ouverture de fissure en fond d'entaille atteignant sa valeur maximale, un seul essai, arrêté prématurément.
- 6	931.40	7.24	Un échantillon atteignant la limite de charge, essai recommencé, non inclus dans ce résumé.
- 18	610.90	7.74	Deux bons essais.

La rupture nette du bitume-époxy indique qu'il ne s'est produit qu'une rupture de mode I ou de type ouvert, élément important pour les modèles de prédiction du comportement.

Des essais de flexion semi-circulaire sur le béton bitumineux ont été récemment étudiés [11] pour évaluer la résistance du béton bitumineux à la rupture, aux températures inférieures à - 20° C. Un schéma de l'essai est illustré sur la Figure A.5.11. L'essai peut être réalisé avec des éprouvettes Superpave fabriquées au moyen d'une presse à cisaillement giratoire ou avec des carottes extraites sur le terrain, très semblables aux éprouvettes en disque, soumises aux essais de traction compacte. Une éprouvette semi-circulaire est fabriquée avec une entaille prédécoupée.

Figure A.5.11. Schéma de l'essai de flexion semi-circulaire



Source : Mihai Marasteanu, Université du Minnesota.

L'éprouvette est chargée verticalement dans une direction parallèle à la propagation de fissures, contrairement à l'éprouvette soumise à l'essai de traction compacte en disque, chargée perpendiculairement à la fissuration.

Le facteur d'intensité de contrainte critique (résistance à la rupture) peut être calculé en fonction de la taille et de la géométrie de l'éprouvette, ainsi que de la charge maximale.

Le béton bitumineux CP 64-28 a été soumis à une détermination de la charge en fonction du déplacement linéaire de la charge, aux températures de - 30° C. Un essai de flexion semi-circulaire a été également réalisé à - 18° C.

Les résultats sont résumés au tableau A.5.3.

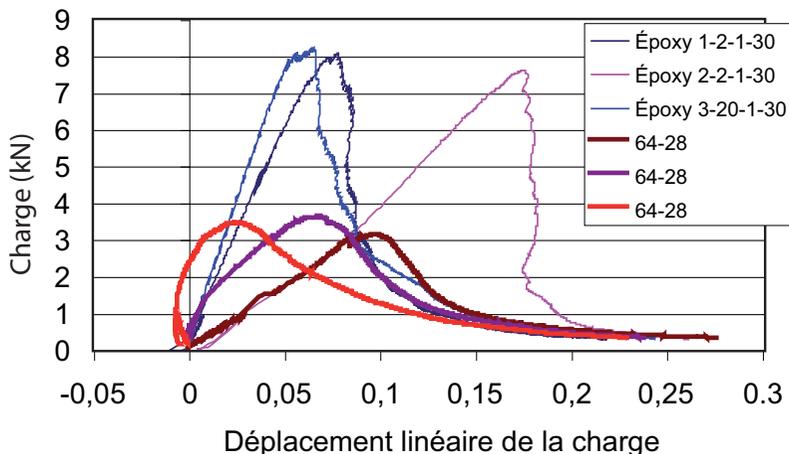
Tableau A.5.3. **Données résumées des essais de flexion semi-circulaire (reproduites avec l'aimable autorisation de Mihai Marasteanu, Université du Minnesota)**

Température (° C)	Enrobé	Énergie de rupture (N/m) [COV %]	Résistance à la rupture, K_{IC} (MPa \sqrt{m}) [COV %]
- 18	Bitume-époxy	690 [19 %]	2.3 [10 %]
- 18	CP 64-22	506 [22 %]	0.92 [7 %]
- 30	Bitume-époxy	447 [14 %]	2.4 [4 %]
- 30	CP 64-22	274 [6 %]	1.0 [3 %]

Comme le montre la Figure A.5.12, pour les deux enrobés comparés, la résistance à la rupture tend à présenter une propriété du matériau plus discriminante et une variation plus faible que l'énergie de fracture, illustrée graphiquement parmi les trois exemples.

Sur le plan qualitatif, ces essais confirment les conclusions des autres essais montrant que l'enrobé de bitume-époxy est beaucoup plus résistant à la fissuration thermique à basse température que les bétons bitumineux traditionnels.

Figure A.5.12. **Résultats de l'essai de flexion semi-circulaire à - 30° C**



Source : Mihai Marasteanu, Université du Minnesota.

APPENDICE B

(RELATIF AU CHAPITRE 7)

Besoins généraux à long terme en matière d'étude des chaussées

Construction de couches de surface minces

Les connaissances sur les caractéristiques qualitatives et quantitatives du processus de chargement dynamique de la chaussée sont essentielles pour le dimensionnement, l'utilisation opérationnelle et l'estimation de l'état d'une chaussée routière.

Les éléments ci-dessous déterminent les besoins de recherche sur les phénomènes physiques se produisant dans la chaussée, sous l'influence des impacts environnementaux et des véhicules.

Les ondes mécaniques qui se propagent à l'intérieur de la chaussée créent des conditions de contrainte et de déformation variables, générant de mini effets de fatigue des matériaux, notamment dans les couches de chaussée.

Les résultats des sollicitations dynamiques ne dépendent pas seulement des modules de rigidité et des coefficients de dilatation des matériaux de chaussées, mais aussi, dans une large mesure, des paramètres suivants :

- Vitesse de propagation des ondes dans les couches.
- Coefficient de Poisson.
- Impédance de l'onde.
- Liaison entre couches.
- Coefficient de frottement entre la roue et la chaussée.

L'influence de ces éléments sur la chaussée doit être comprise et nécessite des recherches supplémentaires.

Les éléments qui ont une influence qualitative et quantitative dépendent de la méthode de dimensionnement du corps de chaussée, des caractéristiques des matériaux utilisés, de la technique de production et de la qualité de construction de la chaussée.

L'élaboration de nouvelles méthodes de diagnostic du dimensionnement, ainsi que de nouvelles techniques de construction et modalités de mise en œuvre exige des recherches approfondies dans le domaine de la modélisation, de la description et de la méthodologie, afin de résoudre les questions thermomécaniques relatives aux corps de chaussées.

Les recherches sur les nouveaux matériaux de construction de chaussées doivent se poursuivre en se centrant sur l'évaluation pratique, non seulement des paramètres de base, comme les modules d'élasticité, mais aussi des autres caractéristiques des matériaux ayant des effets importants, comme le coefficient de Poisson, la vitesse des ondes à l'intérieur de la chaussée (masse volumique), etc.

Ces recherches permettront le développement et la construction de chaussées aux caractéristiques optimales, adaptées aux charges de trafic réelles, à l'état hydrologique et pédologique, ainsi qu'aux conditions environnementales.

APPENDICE C

RAPPORTS D'ESSAIS EN LABORATOIRE PUBLIÉS SUR LE SITE WEB DU CENTRE CONJOINT DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

Rapports d'ordre général

Au cours des recherches et des essais, les membres des groupes Bitume-époxy et Enduit hydraulique fibré gravillonné ont été invités à rédiger des rapports d'essais en laboratoire, afin de partager les résultats avec les autres membres, ainsi qu'avec le personnel de chaque laboratoire national participant.

Le groupe éditorial sur les chaussées à longue durée de vie a accepté que ces rapports soient publiés, mais a décidé qu'ils ne seraient pas inclus dans le présent rapport, pour des raisons d'espace, de coût et de longueur. En revanche, il a été convenu de les publier sur le site Web du Centre conjoint de recherche sur les transports.

Rapports d'essais en laboratoire sur le bitume-époxy

Une liste exhaustive des *Rapports d'essais en laboratoire sur le bitume-époxy* figure sur le site Web du Centre conjoint de recherche sur les transports, à l'adresse suivante :

www.internationaltransportforum.org/jtre/infrastructure/index.html

Tous ces rapports seront déposés sur la partie publique du site Web du CCRT, afin qu'ils puissent être consultés et téléchargés, après publication du présent rapport.

Rapports d'essais en laboratoire sur l'enduit hydraulique fibré gravillonné

Une liste exhaustive des *Rapports d'essais en laboratoire sur l'enduit hydraulique fibré gravillonné* figure sur le site Web du Centre conjoint de recherche sur les transports, à l'adresse suivante :

www.internationaltransportforum.org/jtre/infrastructure/index.html

Tous ces rapports seront déposés sur la partie publique du site Web du CCRT, afin qu'ils puissent être consultés et téléchargés, après publication du présent rapport.

Organismes participants

Les membres des groupes de travail et les laboratoires nationaux qui ont coordonné et/ou participé aux essais sont énumérés aux annexes B et C du présent rapport.

ANNEXE A

LISTE DES ABRÉVIATIONS

PVA	Alcool polyvinylique
BASt	Bundesanstalt für Strassenwesen (laboratoire allemand)
BB	Béton bitumineux
BBDR	Béton bitumineux drainant
BBR	Bending Beam Rheometer - Rhéomètre à flexion de poutre
BSBG	Béton bitumineux semi-grenu
BTM	Béton bitumineux très mince
EHFG	Enduit hydraulique fibré gravillonné
BUHP	Béton à ultra-hautes performances
CAPTIF	Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility (installation sous abri néo-zélandaise d'essais de chaussée accélérés)
CP	Classe de pénétrabilité
DBM	Dense Bitumen Macadam - Enrobé bitumineux dense
DBT	Dansk Beton Teknik (laboratoire danois)
DERZHDORNDI	Derzhavnyi dorozhnii NDI (laboratoire ukrainien)
DSC	Differential Scanning Calorimetry - Calorimétrie différentielle à balayage
DSR	Dynamic Shear Rheometer - Rhéomètre à cisaillement dynamique
FHWA	Federal Highway Administration (direction des routes américaine)
HRA	Hot Rolled Asphalt - Asphalte roulé à chaud
IBDiM	Instytut Badawczy Dróg i Mostów (laboratoire polonais)
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LRPC	Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées
LVDT	Linear Variable Differential Transformer - Capteur de déplacement inductif
NSW RTA	New South Wales Roads and Traffic Authority (direction des routes de Nouvelle-Galles du Sud)
PCC	Portland Cement Concrete - Béton de ciment Portland
SBS	Styrène-butadiène-styrène (adjuvant du bitume)
SHRP	Strategic Highway Research Programme (programme américain stratégique de recherche routière)
SMA	Stone Mastic Asphalt - Asphalte coulé gravillonné

SRT	Skid Resistance Tester - Pendule SRT
SWPE	Scott Wilson Pavement Engineering (société britannique)
T2R	Tribomètre pour revêtement routier
TFHRC	Turner Fairbank Highway Research Centre (laboratoire américain)
TMJA	Trafic moyen journalier annuel
TNZ	Transit New Zealand (direction des routes néo-zélandaise)
TRL	Transport Research Laboratory (laboratoire britannique)
UK-HA	United Kingdom Highways Agency (direction des routes britannique)
UV	Ultraviolets
VD	Vejdirektoratet (laboratoire danois)

ANNEXE B
PROJET DU CENTRE CONJOINT OCDE/FIT
DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS
ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES CHAUSSÉES À LONGUE DURÉE DE VIE :
PHASE II
MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL

Plusieurs pays ont participé activement à l'étude de phase II, avec une grande implication de la part de leurs représentants au sein du groupe de travail et de leurs laboratoires d'essai nationaux (Allemagne, Australie, Danemark, États-Unis, France, Nouvelle-Zélande, Royaume-Uni, Ukraine).

Les membres du groupe de travail désignés par les pays qui ont participé le plus activement sont les suivants :

PAYS	MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL
ALLEMAGNE	M. Stefan LUDWIG Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt) Mlle Nina SLIWA Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt)
AUSTRALIE	M. George VOROBIEFF New South Wales Roads and Traffic Authority (NSW RTA)
DANEMARK	M. Jørgen CHRISTENSEN Président du groupe de travail et du groupe éditorial Vejdirektoratet (VD) M. Anders HENRICHSEN Dansk Beton Teknik (DBT) M. Erik NIELSEN Vejdirektoratet (VD) M. Finn THOEGERSEN Vejdirektoratet (VD)
ÉTATS-UNIS	Dr. Jack YOUTCHEFF Coordinateur technique du groupe Bitume-époxy Turner Fairbank Highway Research Center (TFHRC) Federal Highway Administration (FHWA)

PAYS	MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL
FRANCE	<p>Dr. François DE LARRARD Coordinateur du groupe Enduit hydraulique fibré gravillonné Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)</p> <p>Mme Nelly VULCANO-GRUELLET Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC Autun)</p> <p>M. Ferhat HAMMOUM Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)</p>
NOUVELLE-ZÉLANDE	<p>M. Greg ARNOLD Transit New Zealand (TNZ)</p> <p>M. Phil HERRINGTON Consultant de Transit New Zealand Opus Central Laboratories</p>
POLOGNE	<p>Dr. Miroslav GRACZYK Instytut Badawczy Dróg i Mostów (IBDiM)</p>
ROYAUME-UNI	<p>M. John CHANDLER Transport Research Laboratory Ltd (TRL)</p> <p>M. Richard ELLIOTT Scott Wilson Pavement Engineering (SWPE)</p> <p>M. Wyn LLOYD United Kingdom Highways Agency (UK-HA)</p>
UKRAINE	<p>Mme Tatiana HIMERIK Derzhavnyi dorozhnii NDI (DERZHDORNDI)</p> <p>Mme Kateryna KRAYUSHKINA Derzhavnyi dorozhnii NDI (DERZHDORNDI)</p> <p>M. Valery VYROZHEMSKY Derzhavnyi dorozhnii NDI (DERZHDORNDI)</p>
SECRÉTARIAT OCDE /FIT	<p>M. John O. WHITE Centre conjoint OCDE/FIT de recherche sur les transports</p> <p>M. Ceallach LEVINS Consultant de l'OCDE, Londonderry</p>

MEMBRES DU GROUPE ÉDITORIAL

Les membres du groupe éditorial qui a finalisé la rédaction du rapport sont les suivants :

PAYS	MEMBRES DU GROUPE ÉDITORIAL
DANEMARK	M. Jørgen CHRISTENSEN Président du groupe de travail et du groupe éditorial Vejdirektoratet (VD) M. Anders HENRICHSEN Dansk Beton Teknik (DBT)
ÉTATS-UNIS	Dr. Jack YOUTCHEFF Coordinateur technique du groupe Bitume-époxy Turner Fairbank Highway Research Center (TFHRC) Federal Highway Administration (FHWA)
FRANCE	Dr. François DE LARRARD Coordinateur technique du groupe Enduit hydraulique fibré gravillonné Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)
ROYAUME-UNI	M. Wyn LLOYD United Kingdom Highways Agency (UK-HA)
SECRÉTARIAT OCDE/FIT	M. John O. WHITE Centre conjoint OCDE/FIT de recherche sur les transports

RÉVISEURS EXTERNES

Les deux experts qui ont accepté, à la demande du groupe éditorial, de relire la version provisoire du rapport final sont les suivants :

PAYS	RÉVISEURS EXTERNES
CANADA	M. Michael F. OLIVER Ministère des transports
FINLANDE	M. Heikki JÄMSÄ Asfalttiliitto

AUTRES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL

Les membres du groupe de travail désignés par différents pays qui ont participé moins activement ou par correspondance et/ou dont les laboratoires n'ont pas participé aux essais sont les suivants :

PAYS	AUTRES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL
AUTRICHE	Prof. Johann LITZKA Technische Universität Wien (TUW) Institut für Strassenbau und Strassenerhaltung
AUSTRALIE	M. David MANGAN Southern Australian Asphalt Pavement Association M. Kieran SHARP ARRB Transport Research Ltd
BELGIQUE	Mme Anne BEELDENS Centre de recherche routière (CRR)
FRANCE	M. Jean-Michel PIAU Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) M. Thierry SEDRAN Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)
GRÈCE	M. Andreas LOIZOS National Technical University of Athens (NTUA)
ITALIE	M. Mario ARATA ANAS S.p.A.
JAPON	M. Masahide ITO Public Works Research Institute (PWRI)
NOUVELLE-ZÉLANDE	M. David ALABASTER Transit New Zealand (TNZ)
POLOGNE	Prof. Dariusz SYBILSKI Instytut Badawczy Dróg i Mostów (IBDiM)
PORTUGAL	Mme Helena Maria LIMA Instituto de Estradas de Portugal (IEP)
RUSSIE	M. Nikolay BISTROV The Moscow State Automobile & Road Technical University (MADI)
SUÈDE	Dr. Marianne GRAUERS National Road and Transport Research Institute (VTI) M. Safwat SAID Statens väg-och transportforskningsinstitut (VTI)
SUISSE	M. Markus CAPREZ Eidgenössische Technische Hochschule (ETH)

OECD PUBLICATIONS
2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
(77 2008 02 2 P) ISBN 978-92-82-10161-2 – n° 56146 2008

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

Les chaussées à longue durée de vie peuvent diminuer les coûts d'entretien des réseaux routiers de manière significative, et ceci en y incluant les pertes de temps causées par ces travaux pour les usagers, notamment sur les routes encombrées à forte circulation.

Ces chaussées ont recours à de nouveaux matériaux qui sont plus coûteux que l'asphalte et qui requièrent des traitements spécifiques.

Ce rapport présente les résultats d'une recherche collective destinée à évaluer le potentiel technique et économique des chaussées à longue durée de vie les plus prometteurs et propose à l'intention des gouvernements une façon de peser les risques et avantages liés à l'introduction de tels revêtements sur les routes à forte circulation.

 www.internationaltransportforum.org

éditions **OCDE**
www.oecd.org/editions

(77 2008 02 2 P)
ISBN 978-92-821-0161-2

