



# Etude de montage

Pour un Projet National de Recherche et Développement

## DVDC

### Durée de Vie Des Chaussées

*30 juillet 2015*

Ont contribué à la rédaction de cette étude :

BRETON Fabrice (Vinci Concessions)  
CHAILLEUX Emmanuel (IFSTTAR)  
DELAPORTE Brice (IREX)  
DI BENEDETTO Hervé (ENTPE)  
DONY Anne (ESTP)  
EZAOUI Alan (Eurovia)  
GEORGE Luc-Amaury (Vectra / CINOV)  
HAMMOUM Ferhat (IFSTTAR)  
HERITIER Bernard (RGRA)  
HORNYCH Pierre (IFSTTAR)  
JOUTANG Jean-Luc (Adfors)  
LAYERLE Éric (Eurovia)  
LEROY Christine (USIRF)  
MANGIAFICO Salvatore (ENTPE)  
MARCHAND Jean-Pierre (Route et Conseil)  
ODEON Hugues (Cerema DTerEst)  
PIAU Jean-Michel (IFSTTAR)  
SAUZEAT Cédric (ENTPE)  
SIMONIN Jean-Michel (IFSTTAR)  
VARGA Anna-Maria (EGIS)  
WASNER Sébastien (Cerema DTerMed)

Avec le soutien de la Direction  
Générale des Infrastructures de  
Transport et de la Mer



(convention N° 14/239)

# SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>2</b>
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>3</b>
<b>2 LA PROBLEMATIQUE DVDC</b> .....	<b>4</b>
2.1 ENJEUX.....	4
2.2 CHAMP DE LA RECHERCHE .....	5
2.3 COMPLEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES AU NIVEAU INTERNATIONAL .....	5
2.4 VERROUS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES.....	14
<b>3 PROGRAMME DE RECHERCHE</b> .....	<b>18</b>
3.1 THEME 1 – MECANISMES DE DEGRADATION DES CHAUSSEES.....	18
3.2 THEME 2 – CARACTERISATION DE L’ETAT DU RESEAU .....	30
3.3 THEME 3 – EVALUATION DE LA DUREE DE VIE RESIDUELLE .....	37
<b>4 VALORISATION</b> .....	<b>45</b>
4.1 STRATEGIE DE VALORISATION .....	45
4.2 GUIDES PRATIQUES .....	46
<b>5 ASPECTS ORGANISATIONNELS ET BUDGETAIRES</b> .....	<b>47</b>
5.1 LES PARTENAIRES INTERESSES.....	47
5.2 ORGANISATION .....	47
5.3 BUDGET PREVISIONNEL ET PLAN DE FINANCEMENT.....	49
5.4 PLANNING PREVISIONNEL.....	52
<b>6 ANNEXES</b> .....	<b>53</b>
6.1 ANNEXE 1 – REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LA PARTIE INTERNATIONALE .....	53
6.2 ANNEXE 2 – ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE PHENOMENE D’AUTOREPARATION .....	55
6.3 ANNEXE 3 – CHARTE PROVISoire DU PROJET NATIONAL DVDC .....	56

# 1 INTRODUCTION

---

Ce rapport d'étude de montage pour le lancement d'un projet national sur la Durée de Vie Des Chaussées (DVDC) rentre dans la continuité de l'étude de faisabilité, disponible auprès de l'IREX, validée le 23 octobre 2014 par le comité d'orientation du RGC&U<sup>1</sup>.

Le projet DVDC est un projet de recherche collaborative qui vise à optimiser la planification et le dimensionnement des travaux d'entretien de chaussées, et à développer des méthodes de qualification de l'état et de la durée de vie des chaussées.

L'étude de montage a été réalisée de janvier à juillet 2015. Elle comprend en préambule des compléments apportés à l'étude de faisabilité concernant l'état de l'art au niveau international (cf. § 2.3). Les réponses aux observations émises par le comité d'orientation du RGC&U concernant l'étude de faisabilité font l'objet de la note d'introduction associée au présent document.

Cette étude a bénéficié du soutien financier de la Direction Générale des Infrastructures de Transport et de la Mer (DGITM) du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE).

L'étude de montage a été rédigée à la suite d'un appel à participation ([www.irex.asso.fr/appel-participation-dvdc](http://www.irex.asso.fr/appel-participation-dvdc)) émis début février 2015 sur les thématiques de recherche identifiées lors de l'étude de faisabilité :

- ▶ mécanismes de dégradation des chaussées ;
- ▶ caractérisation de l'état d'un réseau ;
- ▶ évaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées ;

L'appel à participation a permis de recueillir plus de 60 contributions, classées en deux catégories :

- des compléments à l'état de l'art ;
- des actions de recherche qui ont permis d'affiner le programme de recherche et son budget associé.

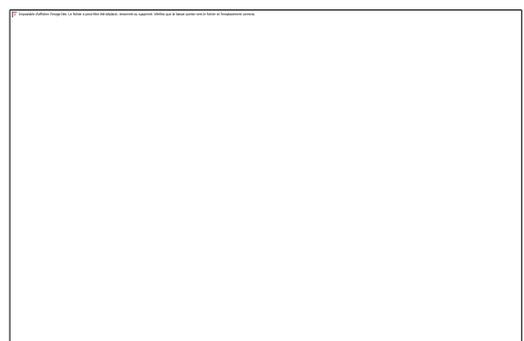
Les propositions d'action de recherche ont été harmonisées et hiérarchisées par un groupe de travail d'une douzaine de personnes qui s'est réuni à cinq reprises. Les travaux ont par ailleurs été discutés à l'occasion de deux réunions plénières d'une trentaine de personnes.

Il est envisagé de traiter un volet du projet dans le cadre d'un projet ANR qui sera, en cas de succès, en lien étroit avec le projet national DVDC. Le sujet porterait sur le comportement de matériaux bitumineux anciens, afin d'évaluer leur état de vieillissement et d'endommagement. Il s'agit d'un point clé pour l'évaluation des chaussées anciennes et l'estimation de leur durée de vie. Des méthodes innovantes nécessitant des développements « amont » seront proposées dans le cadre de ce projet ANR (cf. §3.1.4).

A la demande de la DGITM, l'étude de montage a été complétée par une analyse bibliographique du phénomène d'autoréparation. Cette analyse figure en annexe 6.2 de ce rapport.

Le projet DVDC a été présenté à l'occasion des journées techniques de la route (JTR) co-organisées par l'IFSTTAR, le Cerema et l'IDRRIM les 4 et 5 février 2015. Les présentations du projet sont disponibles sur le site internet des JTR : <http://jtr.ifsttar.fr/programme/>.

Cette manifestation a également été l'occasion de relayer l'appel à participation.



---

<sup>1</sup> Réseau Génie Civil et Urbain



## 2 LA PROBLEMATIQUE DVDC

### 2.1 ENJEUX

Les infrastructures routières sont soumises à un vieillissement naturel induit sous l'effet des sollicitations externes telles que le trafic et le climat. La maintenance et l'entretien des infrastructures routières représentent un enjeu économique considérable, particulièrement dans le contexte où les budgets alloués à ces actions sont de plus en plus restreints par les gestionnaires. Il s'agit donc de maintenir ce patrimoine dans un état garantissant qu'il assure ses fonctions avec un niveau de sécurité admissible pour l'utilisateur.

Le patrimoine d'infrastructures publiques a une valeur extrêmement importante. Pour les chaussées le constituant, il convient de prendre en considération leur coût, leur amortissement en fonction de leur durée d'exploitation, et leur entretien pour en préserver à la fois la valeur patrimoniale et leur capacité à rendre le service attendu. Le sous-investissement ou l'absence d'entretien peuvent conduire à leur dépréciation, ou pire, à leur inadéquation progressive aux services pour lesquels elles ont été conçues, entraînant une perturbation de l'économie locale ou nationale et des risques pour les usagers<sup>2</sup>.

Dans le compte général de l'État<sup>3</sup>, les infrastructures routières, qui regroupent les autoroutes, les ouvrages d'art, les dépendances (assainissement), les aires et l'équipement (signalisation ; glissières ; systèmes d'exploitation) sont valorisées au bilan de l'État au « coût de remplacement déprécié », soit le **coût de reconstruction à neuf diminué du coût d'entretien**. Cette valorisation est en principe revue à chaque arrêté de comptes.

Tableau 1. Coût de reconstruction à neuf du réseau routier national français

Réseau national	Longueur (km)	Valeur 2010
non concédé	12 000	125 milliards d'€
Concédé	8 000	125 milliards d'€
<b>Total</b>	<b>20 000</b>	<b>250 milliards d'€</b>

Ce montant de 250 milliards d'euros représente 2/3 des immobilisations corporelles de l'État (bâtiments ; ports ; aéroports...).

Si l'on ajoute les routes départementales et les voies communales (1 million de kilomètres), la valeur de ce patrimoine, en rapport avec l'investissement réalisé pour les construire, est estimée pour l'ensemble à **2000 milliards d'euros**, chiffre à rapprocher du PIB du pays.

L'entretien et le maintien de ce patrimoine est donc un enjeu considérable. Pour un gestionnaire de réseau routier, la connaissance de la durée de vie des structures de chaussées (initiale et résiduelle au cours du temps) est un élément clé pour définir la programmation et la budgétisation de ses dépenses.

Les objectifs de ce Projet National se concentrent sur l'évaluation de la durée de vie des chaussées, qui comporte deux aspects.

La durée de vie structurelle d'une chaussée est constituée par la période écoulée depuis sa date de mise en service jusqu'à l'apparition de dommage **nécessitant une reconstruction au moins partielle**.

La durée de vie d'une couche de roulement se caractérise quant à elle par la période écoulée depuis sa date de mise en service jusqu'à l'apparition des dommages ou de caractéristiques dégradées nécessitant son entretien. Cet entretien est fonction du trafic supporté par la voie, et du niveau de service fixé par le maître d'ouvrage.

<sup>2</sup> Livre blanc de l'IDRRIM « Entretien et préserver le patrimoine d'infrastructures de transport : une exigence pour la France », octobre 2014

<sup>3</sup> La route un patrimoine, Cotita Est, Dole, novembre 2011



## 2.2 CHAMP DE LA RECHERCHE

Le champ de la recherche du projet DVDC inclut :

- ✓ le comportement structurel des chaussées et son évolution au cours du temps,
- ✓ les aspects mécaniques relatifs aux couches de roulement, mais hors caractéristiques de surface,
- ✓ l'évaluation de l'état structurel à un instant donné et la prévision de la durée de vie résiduelle,
- ✓ la définition de nouveaux indicateurs d'état des chaussées adaptés à chaque type de réseau routier,
- ✓ l'identification des besoins de recherche associés à ces thèmes.

On exclura les indicateurs coûts sociaux liés aux usagers (dépenses d'énergies, retards dus aux travaux...).

## 2.3 COMPLEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES AU NIVEAU INTERNATIONAL

### 2.3.1 Préambule

L'objectif de cet état de l'art au niveau international est de recenser les recherches entreprises dans les domaines qui vont être étudiés dans le cadre du projet DVDC, et de les analyser avec trois objectifs :

- ▶ bien définir ce qui est le cœur du thème de recherche DVDC, - durée de vie des chaussées - et non pas les chaussées à longue durée de vie ;
- ▶ montrer que certaines recherches en cours ou réalisées confirment les orientations prises dans le projet DVDC. Il faut approfondir un manque de connaissance mis en évidence. Ce point est tout particulièrement d'actualité pour le dimensionnement des chaussées et la prise en compte de leur comportement ;
- ▶ confirmer que le choix de ne pas aborder tel ou tel sujet (recyclage par exemple) se justifie par le fait que des recherches ont été entreprises récemment ou sont en cours.

### 2.3.2 Durée de vie des Chaussées et Chaussées à longue durée de vie

Il y a un risque sous-jacent dans l'intitulé du projet DVDC ou « Durée de vie des chaussées ». C'est celui d'assimiler DVDC à « Chaussées à longue durée de vie » voire « Innovations pour les chaussées du futur ». Ces deux derniers thèmes ont fait l'objet de projets de recherche européens que l'on va rappeler ci-dessous.

#### 2.3.2.1 Chaussées à longue durée de vie

Trois initiatives peuvent être évoquées sur cette thématique.

La première émane des journées techniques du LAVOC (LABoratoire des VOies de Circulation) de 2007, le Pr A-G Dumont de l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) a présenté [1] une « Analyse des chaussées à longue durée de vie dans le monde » devant répondre aux deux principales questions :

- pourquoi certaines routes présentent-elles des durées de vie remarquablement longues (40 années au lieu de 20 par exemple)
- comment peut-on concevoir et réaliser des chaussées à longue durée de vie et surtout sur quel élément de la structure doit-on agir ?

Si le thème n° 2 sous-tend celui de la « chaussée perpétuelle », qui est hors du cadre de DVDC, la première question est à mettre en relation avec :

- les incertitudes liées à l'estimation ou à l'action du trafic ;
- la (non) prise en compte des actions climatiques ;
- la caractérisation mécanique des matériaux.

C'est pourquoi A-G Dumont propose de retenir et de définir le concept de "cas de réussite" (*success stories*) comme étant *une section de chaussée qui démontre qu'elle peut durer plus longtemps que prévu lorsqu'elle a été construite*.

Cette approche rejoint la notion de calage de la méthode de dimensionnement par le suivi de sections tests et d'essais qui sera détaillée au § 2.3.4 de ce rapport.

Quelques principes fondamentaux sont repris par DVDC :

- ▶ insister sur la qualité de portance des plates-formes et des sous-couches. C'est l'objet de la proposition de recherche PR1-2 (Sols supports et chaussées souples) de l'appel à participation ;
- ▶ investir dans l'épaisseur des couches plutôt que dans la performance mécanique pure des matériaux. Il ne s'agit pas dans DVDC de mettre au point des matériaux performants (voir chapitre 1.2) mais de comprendre les mécanismes des matériaux actuels en y incluant leur vieillissement au cours du temps ;
- ▶ focaliser sur l'homogénéité (épaisseurs, compactage, collage aux interfaces, etc.). On retrouvera ces points dans les propositions PR 1-3 (Comportement des interfaces) et PR1-4 (Caractérisation des matériaux) ;
- ▶ s'assurer contre les eaux d'infiltration par le drainage et l'assainissement des plates-formes mais également aux interfaces des couches. C'est l'objet des recherches proposées sur les sols supports (PR1-2) et sur l'action répétée des phénomènes de gel-dégel à faible amplitude thermique autour de 0°C, sur les couches de roulement (PR1-5).

La deuxième émane du FEHRL<sup>4</sup> qui a permis de faire émerger le groupe européen sur les chaussées à longue durée de vie ou European Long Life PAVement Group (ELLPAG) [2] dont les objectifs sont :

- à court terme, effectuer un état de l'art des connaissances européennes dans le domaine de la conception et de l'entretien des chaussées souples, bitumineuses, semi-rigides et en béton de ciment ;
- à moyen terme, organiser des séminaires pour promouvoir la connaissance et l'utilisation des chaussées à longue durée de vie ;
- enfin rédiger des guides de bonnes pratiques sur ces chaussées à partir des retours d'expérience en Europe.

La troisième initiative vient de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) qui dans un domaine similaire a entrepris des recherches dont le résultat se présente sous la forme d'un rapport intitulé « Des chaussées à longue durée de vie pour routes à forte circulation » paru en 2008 [3].

Partant du principe que dans la plupart des pays, le réseau routier constitue l'un des patrimoines communs les plus importants, il appartient aux gestionnaires d'entretenir, exploiter, améliorer, remplacer et préserver ce capital tout en le gérant avec des ressources financières et humaines limitées.

Comme le maintien de revêtements sûrs, confortables et durables sur les autoroutes et routes principales à fort trafic représente depuis longtemps un défi, la question de l'allongement de la durée de service des chaussées routières est devenue une préoccupation essentielle du secteur depuis plus d'une décennie, d'où l'apparition du terme « chaussées à longue durée de vie » par opposition au terme « chaussées durables », qui a longtemps 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.

Deux innovations particulièrement innovantes ont été retenues : le *bitume-époxy* et l'*enduit hydraulique fibré gravillonné*, qui ne seront pas regardées dans le cadre de DVDC du fait qu'il s'agit de chaussées à longue durée de vie et de couche de roulement.

### 2.3.2.2 Innovations pour les chaussées du futur

Un certain nombre de projets de recherche ont abordé le thème de la chaussée du futur.

<sup>4</sup> FEHRL : Forum of European National Highway Research (Forum Européen des Laboratoires Nationaux de Recherche)



On citera en priorité le projet NR2C (New Road Construction Concept) lancé en 2002, soutenu par le FEHRL et retenu par la Commission Européenne dans le cadre de son 6<sup>ème</sup> appel à projets [4]. NR2C [5] propose des innovations potentielles et de nouveaux concepts pour les routes européennes au cours des décennies à venir (objectif 2040) dans le domaine des infrastructures urbaines, interurbaines et des ouvrages de génie civil. A cette fin un grand nombre de suivi de chantiers ont été entrepris.

On trouve dans le même ordre d'idée le projet de Route de 5<sup>ème</sup> génération (R5G) [6] lancé par l'IFSTTAR<sup>5</sup> avec pour fil conducteur « Quelle infrastructure dans vingt ans et quels services peut-on en attendre ? ».

En France, l'ADEME a lancé en juillet 2015 un appel à projet sur la « route du futur ».

### 2.3.3 La durée de vie des couches de surface

Il est utile de rappeler que les symposiums sur les caractéristiques de surface des chaussées, plus communément dénommés SURF, et organisés tous les 4 ans par l'AIPCR, abordent les qualités requises des couches de surface en terme d'adhérence, d'uni et de confort acoustique.

SilVia (Silenda Via ou Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control) lancé par le FEHRL (2002-2005) dans le contexte du 5<sup>ème</sup> programme cadre de la Commission européenne [7] traite de la durabilité et des coûts des techniques et matériaux utilisés pour des revêtements peu bruyants.

Le projet CLEAN (2009- 2012) - Chaussées à Longévité Environnementale Adhérente et Nettoyante – [8] fait suite au projet ELLPAG (cf. § 1.a). Il a consisté à développer un système constructif de couche de roulement routière à longue durée de vie et à fonction dépolluante. Il rejoint à ce titre les projets évoqués au paragraphe 1.1 qui ne sont pas abordés par DVDC.

### 2.3.4 Méthodes de dimensionnement

Le projet national suisse REDIRE lancé en 2013 pour une révision de la méthode de dimensionnement des chaussées neuves et des renforcements part du même constat que DVDC, à savoir une insuffisance actuelle des données, des paramètres ou des critères pour déterminer la durée de vie des chaussées.

D'autant plus que la méthode suisse de dimensionnement est plutôt de type empirique et peu sujette aux évolutions ou changements.

#### 2.3.4.1 Panorama sur les méthodes de dimensionnement

Dans sa présentation lors des Journées Techniques du LAVOC de 2012 [9], Sara Bressi évoque, en faisant un panorama des méthodes de dimensionnement suisse, française, allemande, sud-africaine et américaine, le **manque de connaissances sur deux sujets de recherches principaux qui seront traités par DVDC, à savoir :**

- **Le vieillissement des matériaux et son influence sur les caractéristiques mécaniques ;**
- **La trop grande simplification des interactions entre couches aux interfaces ;**

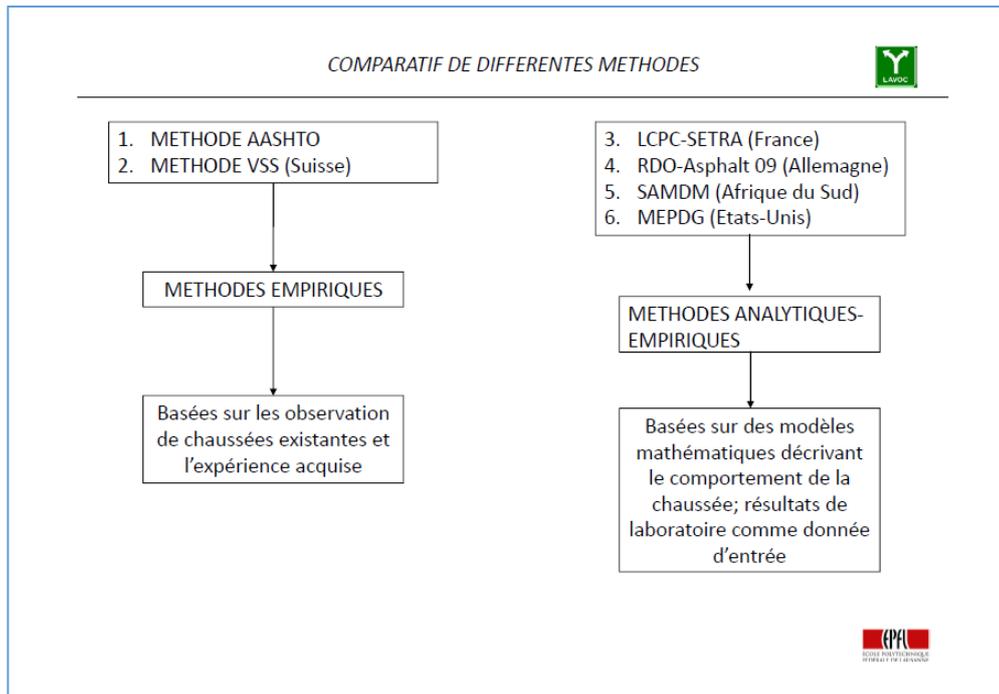
Auxquels viennent s'adjoindre des thèmes également abordés par DVDC :

- **La nécessité de mieux connaître certaines propriétés du sol ;**
- **Les cycles gel-dégel.**

---

<sup>5</sup> IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux



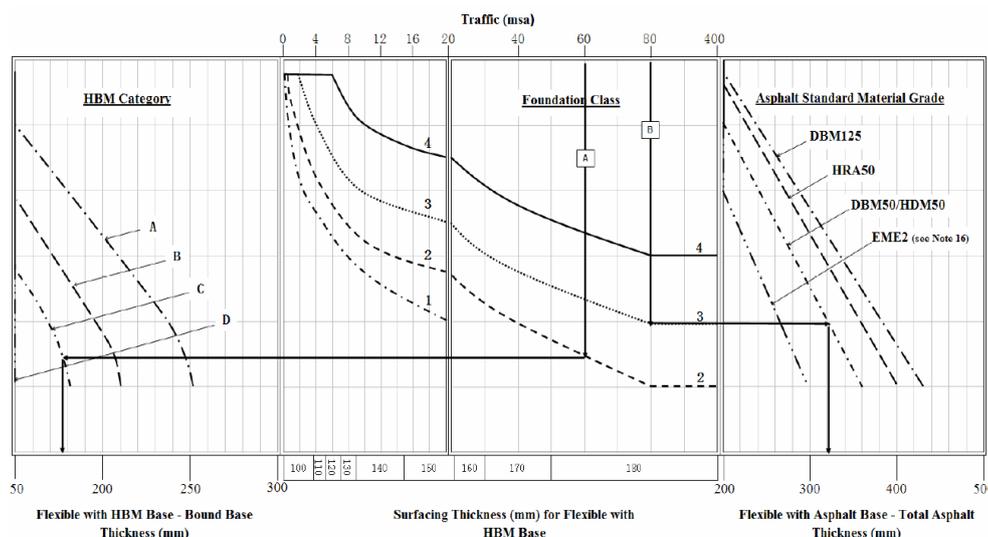


Cette analyse très pertinente sur 5 pays peut être complétée par celle relative à la méthode anglaise de dimensionnement pour les chaussées (bitumineuses et rigides) qui est fondée sur des résultats empiriques issus de l’analyse du comportement de sections de routes [10] [11]. L’approche utilisée pour le dimensionnement des chaussées en béton est également empirique.

Cependant depuis 1997, la méthode introduit le concept de *long-life pavement* (chaussée à longue durée de vie - généralement 40 ans) et permet l’utilisation de « nouveaux matériaux » de type enrobé à module élevé de classe 2 (EME2).

Sachant que l’essieu de référence britannique est de 80 kN (8 t) le concept de *long-life pavement* est à relativiser dans le contexte français d’un essieu de 130 kN (13 t).

Dans le cas des structures de chaussées non rigides, l’épaisseur de la chaussée est définie à l’aide du graphique de la figure suivante, ayant comme données d’entrée la classe de la plate-forme et du trafic.

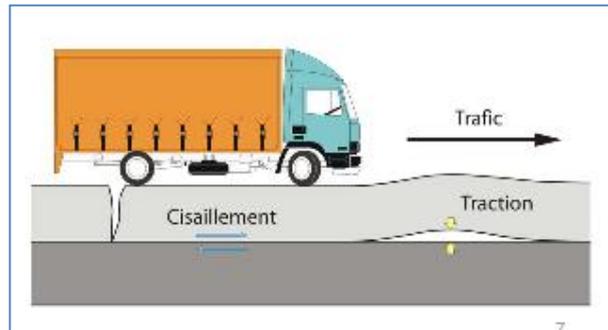


Remarque : Le comportement en fatigue n’est pas considéré comme le critère de dimensionnement puisque la méthode considère que la ruine des chaussées bitumineuses est provoquée par les fissurations venues de la partie supérieure de la chaussée.

Dans la méthode de dimensionnement espagnole [12] le climat intervient uniquement dans le choix des matériaux et éléments de construction.

### 2.3.4.2 Conditions aux interfaces

Pour compléter ce panorama international sur le dimensionnement, le Centre de Recherche Routière belge (CRR) insiste dans une communication lors du congrès belge de la route en 2013 [13] sur l'importance des conditions de collage et de l'adhésion inter-couches pour la durabilité des voiries.



Selon les auteurs, la durabilité d'une voirie nécessite d'obtenir *réellement* le collage des couches là où cela est escompté au niveau du projet et du dimensionnement.

Ils notent cependant un manque de recommandations/spécifications pour les forces de liaison à envisager en laboratoire (dans le cadre d'études pour un contrôle antérieur du collage inter-couches) et sur chantier (pour la réception de chantiers).

Cette analyse est confirmée par la communication de Raab et Partl [14] qui porte sur l'utilisation de grille de verre ou de membranes anti-fissures à l'interface entre la couche de roulement et son support.

Dans le cas de la méthode allemande de dimensionnement des structures de chaussées bitumineuses - RDO-Asphalt09 [15], l'hypothèse d'une liaison totale (ou collée) est retenue pour le calcul entre toutes les nouvelles couches à appliquer pour une structure neuve. C'est également le cas lors de travaux de rechargement.

Le collage est considéré comme effectif si les exigences de liaison entre les couches définies dans les ZTV Asphalt-StB [16] sont respectées sur des carottes prélevées après mise en œuvre et testées à 20°C. Dans le cas contraire, la liaison collée doit être totalement exclue des calculs.

A titre d'information (voir photo ci-après) il est demandé une valeur > 15 kN au test de cisaillement [17] sous la couche de roulement et > 12 kN entre deux couches inférieures (test non réalisable sous un enrobé drainant ou des couches d'épaisseur < 2,5 cm, souvent utilisées sur autoroute).



Pour montrer toute l'importance que revêt le sujet des interfaces dans les chaussées, on rappellera que la 8<sup>ème</sup> conférence internationale de la RILEM<sup>6</sup> qui se tiendra à Nantes du 7 au 9 juin 2016 est consacrée aux « Mécanismes de fissuration et décollement dans les chaussées ».

### 2.3.4.3 Variations gel-dégel

La prévention de la pénétration du front de gel dans le sol support lors de grands froids est bien prise en compte dans les méthodes de dimensionnement. En revanche ces dernières années sont apparues des dégradations dans les couches de surface (couche de roulement et couche de liaison) lors d'hivers peu rigoureux mais présentant une fréquence élevée d'amplitude comprise entre -10 °C et + 10 °C.

Alors que ce phénomène a pris de l'ampleur en France ces cinq dernières années avec la présence d'humidité dans des enrobés soumis à des conditions climatiques variables (chaud/ froid), il a été considéré comme un sujet de premier plan aux Etats-Unis dès le début des années 2000. Il a donné lieu à des débats au cours du congrès de San Diego en février 2003 [18]. Il en est notamment ressorti que les teneurs en vides et les formulations (y compris le choix des granulats) ont un impact significatif sur le vieillissement prématuré de l'enrobé consécutif à des cycles de gel/dégel.

Une communication sur « Comment éviter les dégradations hivernales des réseaux routiers? » [19] lors du congrès Interoute de 2010 rappelle l'importance de ce thème.

Plus récemment une thèse de doctorat a été soutenue en 2014 sur ce sujet par S. Lamothe [20], un doctorant de l'ENTPE<sup>7</sup> et de l'ETS<sup>8</sup> de Montréal au Canada.

Au Québec, lors de la période de gel et dégel, l'enrobé bitumineux, constituant le revêtement de la chaussée, est soumis à des conditions sévères qui le dégradent :

- précipitations de pluie et fontes de neige générant une saturation partielle du matériau,
- entretien hivernal nécessitant la présence de sel déverglaçant et sollicitant chimiquement le matériau,
- passages de véhicules lourds sollicitant mécaniquement le matériau,
- variations de températures et présence de cycles de gel-dégel engendrant la création de contraintes et de déformations de nature thermique (couplage thermomécanique) et de pressions internes au sein du matériau lors de la congélation de l'eau ou des saumures.

On rappellera à ce sujet l'article publié en octobre 2012 [21] dans la Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA) ainsi que l'étude belge sur l'essai de tenue à l'eau ITSr (*indirect tensile strength ratio*) [22].

### 2.3.5 Retour d'expériences et suivi de sections tests et d'essai

Dans le cadre du SHRP (Strategic Highway Research Program) les Etats-Unis ont lancé au milieu des années 80 un vaste programme de recherche dans le domaine des infrastructures routières. Parmi les thèmes traités, le LTPP (Long-Term Performance Pavement) tient une place prépondérante.

Il s'est agi de mettre en place la collecte de données sur plus de 2000 sections tests dans tous les états américains sur une période de test de 20 ans. La Federal Highway Administration (FHWA) a eu la responsabilité opérationnelle pour les études et maintient un site Web de ressources pour l'information actuelle et historique [23].

Pour les partenaires du programme DVDC, la méthode retenue pour le suivi pourra être source d'inspiration afin de constituer une base de données sur chaque section d'essai comprenant : son environnement et son contexte, le trafic supporté, son historique, l'entretien réalisé, les matériaux utilisés.

---

<sup>6</sup> Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux

<sup>7</sup> Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

<sup>8</sup> Ecole de Technologie Supérieure



On pourra également s'inspirer des méthodes de suivi des techniques anti-fissures qui ont été présentées lors des conférences « Reflective Cracking in Pavements » qui se sont déroulées entre 1989 et 1997 à Liège [24] et dans un article de la RGRA dans le cadre de l'observatoire des techniques de chaussées [25].

### 2.3.6 Auscultation et caractérisation de l'état d'une chaussée

La nécessité de connaître la déformabilité de la chaussée a été confirmée par la tenue d'un symposium en Belgique sur le Curviamètre [26] consacré à l'interprétation et l'exploitation des mesures de cet appareil d'auscultation.

Ce symposium vient compléter le code de bonne conduite proposé en Belgique [27] dans le cadre de l'auscultation structurale des chaussées. On retiendra que les mesures de portance à grand rendement sont réalisées avec le déflectomètre à masse tombante (FWD), le déflectographe ou le Curviamètre® tandis que les mesures ponctuelles se font au moyen de la poutre Benkelman.

Selon le rapport COST 354 [28] « Performance indicators for road pavement » de 2008 la plupart des études visant à définir les indicateurs de performance structurale de la capacité portante s'accordent sur le fait que la durée de vie résiduelle de la chaussée se calcule sur la base de son état actuel et sur le volume de trafic attendu.

Ce n'est donc pas un véritable indicateur de performance que l'on recherche mais davantage le résultat final de l'analyse de la performance attendue de la structure nécessitant :

- la définition de la structure actuelle analysée (par exemple au moyen de l'épaisseur des couches , de leurs modules d'élasticité, de la nature des interfaces);
- l'estimation du trafic cumulé attendu pendant sa durée de vie future;
- la définition des conditions d'exploitation (y compris les conditions environnementales);
- la définition de la loi de dommages pour permettre le calcul de la durée de vie résiduelle de la chaussée.

La plupart des aspects ci-dessus ne sont pas standardisés mais sont communément admis dans le domaine. En particulier la loi de dommages générale peut être différente d'un pays à l'autre.

L'analyse de la base de données COST 354 a mis en évidence que la déflexion est l'indicateur le plus utilisé pour caractériser la capacité portante de la chaussée routière. Malheureusement pour la définition de ce paramètre technique, la base de données issue du COST 354 ne permet pas de fournir un indicateur commun à plus d'un pays.

Toutefois, selon la littérature la mesure de déflexion la plus répandue au niveau international est celle issue de l'appareil FWD (Falling Weight Deflectometer). Le COST Action 336 [29] a mené en 1996 une étude approfondie sur la thématique du FWD.

Le paramètre technique le plus approprié dans ce cas est le suivant :

$$SCI_{300} = D_0 - D_{300}$$

où :

- $SCI_{300}$  est l'indice de courbure de la surface ;
- $D_0$  est la déflexion sous la plaque de charge ;
- $D_{300}$  est la déflexion mesurée dans le géophone situé à 300 mm de distance de la plaque de charge ;

Les résultats du projet PARIS [30] ont montré que cet indicateur  $SCI_{300}$  est très bien corrélé avec le mécanisme de propagation de la fissuration dans une chaussée bitumineuse.



### 2.3.7 Indicateurs de performance d'une chaussée

Sur ce sujet, le rapport COST 354 [28] fournit des informations très intéressantes dont les principaux résultats sont l'élaboration d'indicateurs de performance pour des revêtements de chaussées en prenant en compte les besoins des usagers de la route et les attentes des gestionnaires routiers.

Les indicateurs de rendement sont définis pour différents types de structures de chaussées et catégories de route.

Dans un premier temps il s'agit d'indicateurs (Performance Index ou PI) décrivant une seule caractéristique de l'état des chaussées (uni longitudinal, uni transversal, macrotecture, adhérence, capacité portante, fissuration, bruit, pollution de l'air).

Ensuite ces indicateurs ou indices sont regroupés dans le but d'obtenir une note globale dans trois domaines :

- fonctionnel (sécurité et confort) ;
- structurel ;
- et environnemental (bruit et pollution de l'air).

*In fine* on élabore un index global pour décrire l'état général de la chaussée, qui peut être utilisé pour la gestion de la section ou du réseau routier.

Si les indicateurs fonctionnels liés à la sécurité et au confort sont généralement similaires dans le choix des critères retenus, quelle que soit la méthode de relevé choisie, il n'en est pas de même avec l'indicateur structurel, pour lequel il existe une grande variété d'approches : relevés de dégradations, prise en compte de la déformabilité de la chaussée, épaisseur équivalente (ou structural number SN<sup>9</sup> développé par l'AASHTO) ...

Malgré cela l'approche globale retenue dans ce rapport sera fort utile pour le projet DVDC.

### 2.3.8 Influence des changements climatiques sur la durée de vie des chaussées

Il faut faire la différence entre les variations (ou facteurs) climatiques et le changement climatique.

Le comportement des voiries, et en particulier celui des revêtements bitumineux, est très sensible aux **facteurs climatiques** (et aux éléments naturels qui les accompagnent) tels que la température, l'eau, le gel et ses conséquences (agents de déverglaçage), l'air et les rayons UV. Ces variations climatiques ont un impact sur les caractéristiques des matériaux (portance des sols, module et résistance à la fatigue des matériaux traités..) qui interviennent dans les données pour le dimensionnement des chaussées.

Le code de bonne pratique belge [27] pour le « choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l'entretien des chaussées » aborde de façon très pragmatique cet aspect.

En revanche le **changement climatique**, en intensifiant certains phénomènes extrêmes, modifie le niveau de risque réel des infrastructures vis-à-vis des phénomènes météorologiques (précipitations, vent...) et remet en cause certaines règles de conception des ouvrages. Même si le projet DVDC ne traite pas de l'influence du changement climatique sur les infrastructures routière et de leur impact sur la vulnérabilité de celles-ci, il est important d'en rappeler les grandes lignes.

A mi-chemin entre ces deux concepts, on citera le projet TRACC (Techniques Routières Adaptées au Changement Climatique) [31] issu d'un programme européen soutenu par INTEREG III qui a réussi à concilier ces deux aspects. Le logiciel Tracc-expert permet, sans être un outil de dimensionnement, de **sélectionner les techniques routières d'entretien adaptées au changement climatique et qui répondent aux attentes des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre et des entreprises**. Il prend en compte leurs objectifs environnementaux,

<sup>9</sup>  $SN = 0,039 \sum_{i=1}^n a_i \cdot h_i$

Avec  $a_i$  coefficient structurel du matériau de la couche  $i$

$h_i$  : épaisseur (en mm) de la couche  $i$

$n$  : nombre de couches de la chaussée



économiques et d'acceptabilité sociale. Il est constitué d'une très importante base de données des techniques routières à faible empreinte environnementale. Il constitue un précieux **outil d'aide à la décision susceptible de définir** une politique routière ou de trouver les techniques routières les plus adaptées à ses besoins et à ses objectifs. Le logiciel permet pour chacune d'elles de connaître ses performances, son référentiel normatif, ses limites et ses conditions d'emploi ainsi qu'un panel de chantiers de référence.

L'intégration du risque climatique dans la conception et la gestion des infrastructures est abordée dans plusieurs projets de recherche français et européens, nous citons ci-dessous quelques exemples.

Le projet GeRiCi (Gestion des Risques liés au changement Climatique pour les Infrastructures) finalisé par Egis en 2007 [32] dans le cadre d'un programme RGCU (Réseau Génie Civil et Urbain) a été cofinancé par le ministère de l'Équipement. C'est un outil concret d'anticipation et de gestion du risque accessible aux maîtres d'ouvrages et aux exploitants. Un outil de gestion des risques permet à un gestionnaire de déterminer les zones vulnérables de son infrastructure pour lui permettre d'intervenir à temps, et de proposer des dispositions palliatives types pour traiter les risques identifiés.

La réflexion sur l'intégration du risque climatique dans la conception et la gestion des infrastructures a été le sujet principal du projet européen RIMAROC (Risk Management for Roads in a Changing Climate). Le programme a été achevé en 2010. L'objectif était de mesurer l'impact économique et social sur les réseaux routiers d'événements climatiques exceptionnels, mais également d'en mesurer l'impact lié au report du trafic sur des réseaux connexes.

Le projet européen ROADAPT (Roads for today, Adapted for tomorrow) constitue une suite du projet RIMAROC, auquel participe Egis dans le consortium Européen constitué des sociétés Deltares (NL), SGI (S) et KNMI (NL). Ce projet fait partie du CEDR transnational road research programme.

Plus récemment le sujet du changement climatique a été abordé dans le magazine de recherche de l'IFSTTAR [33].

Enfin l'AIPCR a publié en 2012 un rapport « Prendre en compte les effets du changement climatique sur les chaussées routières [38].

### 2.3.9 Recyclage et durée de vie

Le recyclage des matériaux de chaussées fait partie intégrante de la durée de vie des chaussées. Il comporte la caractérisation des matériaux réutilisés, leur intégration (partielle ou totale) en tant que nouveau produit dans la chaussée.

Ce sujet a été étudié dans le cadre du projet européen SAMARIS (Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructures) en 2006 sous les auspices du FEHRL (5<sup>ème</sup> appel à projets de la Commission Européenne) avec pour objectif, pour les chaussées, une meilleure utilisation des matériaux recyclés.

De la même façon le projet européen RE-Road (Recycling the Road) achevé en 2012 a défini des perspectives pour la réutilisation des agrégats d'enrobés (Reclaimed Asphalt).

Le projet de recherche espagnol FENIX d'une durée de quatre ans est structuré autour de 12 thèmes de recherche dont le recyclage à chaud. L'objectif est de chercher de nouvelles technologies qui permettent d'obtenir des bétons bitumineux à chaud de haute qualité utilisant des taux importants de matériaux fraisés, allant jusqu'à 70%, tout en permettant une augmentation des performances des revêtements routiers.

On peut considérer que le projet national MURE (Multi-Recyclage et Enrobés tièdes) œuvre dans la poursuite de cet objectif, avec une attention toute particulière sur le fait que le recyclage commence à concerner des couches d'enrobés qui contiennent déjà des matériaux recyclés. Combien de fois peut-on recycler sans altérer les performances d'usage des enrobés ?

Les résultats fournis par MURE pourront être intégrés dans le projet DVDC.

On n'oubliera pas le recyclage des chaussées en béton de ciment et plus généralement du béton dans les chaussées. En Allemagne cette procédure est fréquente [34]. Après fracturation des dalles de l'ancienne chaussée, celles-ci sont concassées. Après enlèvement de la fraction sableuse, les agrégats de béton sont réutilisés dans la nouvelle couche de chaussée en béton.

On citera également la thèse sur le (multi)recyclage du béton soutenue en 2012 [35] ainsi que le projet national Recybéton [36] dont les enjeux – le recyclage du béton dans le béton - dépassent largement le cadre d'une application nationale.

### 2.3.10 Enjeu économique de la durée des chaussées y compris stratégie d'entretien.

On citera dans cette rubrique qui est plutôt de la compétence du groupe EA 3, l'intéressant document publié par l'OCDE [37]. Il mentionne que dans beaucoup de pays qui ont achevé la construction de leur réseau routier, les principales dépenses sont dédiées à l'entretien et à la maintenance du réseau.

Il s'agit donc de réduire pour le futur les dépenses d'entretien par le choix de chaussées à longue durée de vie. C'est pourquoi le rapport dessine les grandes tendances sur la disponibilité des méthodes, techniques et matériaux les plus appropriés pour accompagner le développement de ces chaussées à grande durée de vie et il fournit les critères économiques pour quantifier leur apport dans le cas de chaussées soumises à de fort trafic.

## 2.4 VERROUS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

L'étude de faisabilité DVDC de juillet 2014 a permis de mettre en évidence un certain nombre de verrous scientifiques et techniques à lever pour mettre en place une méthode d'évaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées. Il en est rappelé dans ce paragraphe les éléments les plus importants, qui seront traités dans le programme de recherche.

Trois types de verrous scientifiques et techniques ont été identifiés :

- ▶ ceux relatifs à la meilleure compréhension de certains **mécanismes d'endommagement des chaussées** (vieillesse, fissuration, dégradation des interfaces, détérioration des couches de surface), afin de pouvoir expliquer les dégradations, et évaluer l'état résiduel des chaussées ;
- ▶ ceux relatifs à l'**auscultation des chaussées**, afin de mieux caractériser l'état actuel d'une chaussée, et notamment ses caractéristiques structurelles et son niveau d'endommagement ;
- ▶ ceux relatifs à la **modélisation des chaussées**, à la fois en ce qui concerne les méthodes de dimensionnement des chaussées neuves, et la modélisation de chaussées fissurées ou endommagées (et le calcul de renforcements de telles chaussées).

### 2.4.1 Mécanismes d'endommagement des chaussées

Le nouveau guide technique « Renforcement des structures de chaussées » (document IDRRIM, en cours de publication) définit une méthodologie pour l'évaluation de l'état d'endommagement d'une chaussée ancienne avant renforcement. Cette méthodologie comprend 3 phases :

- une première phase de recueil de données ;
- une deuxième phase qui consiste à effectuer un diagnostic de la chaussée, visant à comprendre son (ses) mécanisme(s) d'endommagement ;
- une troisième phase pour le calcul d'endommagement proprement dit. Il s'agit ici de calculer l'endommagement « théorique » de la chaussée, en s'appuyant sur la méthode de dimensionnement, et en prenant en compte le trafic réel subi par la chaussée et les différentes phases d'entretien éventuelles de la chaussée.



Le calcul d'endommagement s'effectue par phases, de la manière suivante :

- Le modèle initial de structure de chaussée est la chaussée dans son état neuf, sauf défaut de réalisation avéré. Le module des couches non liées est celui estimé par calcul inverse à partir de la déflexion caractéristique (cf. phase 2). L'état des matériaux liés est considéré comme sain, les caractéristiques mécaniques étant les caractéristiques de référence de dimensionnement.
- A chaque phase d'entretien, le modèle de chaussée est modifié en fonction des éventuelles données d'auscultation disponibles, en fonction de la cause déclenchant les travaux (ex : couche de surface fissurée). Les dommages sont calculés à chaque phase, en utilisant les principes de la méthode de dimensionnement. Ces dommages sont cumulés en utilisant la loi de Miner.

Une des difficultés de cet exercice consiste à déterminer de manière fiable le ou les dates d'apparition des désordres constatés (ex : décollement d'interface, matériau d'assise fissuré). En effet, on ne dispose pas toujours d'auscultations ou de relevés de dégradations permettant de situer le début de ces désordres, et des hypothèses plus ou moins précises doivent être faites.

Le nouveau guide technique « Renforcement des structures de chaussées » présente l'intérêt de proposer une démarche rationnelle, et simple, pour calculer l'état d'endommagement d'une chaussée, s'appuyant sur les bases de la démarche de dimensionnement.

Cette méthode présente cependant plusieurs limites qui constituent autant de verrous explicités dans les paragraphes suivants.

### Prise en compte des autres mécanismes de dégradations

Les seuls mécanismes d'endommagement pris en compte sont ceux de la méthode de dimensionnement (fatigue des couches liées, déformations permanentes des matériaux non liés) et les autres modes de dégradation ne sont pas pris en compte. Il existe d'autres modes de dégradations des structures de chaussées encore mal compris aujourd'hui, et non (ou mal) pris en compte dans les méthodes de dimensionnement. Il s'agit des dégradations dues à l'évolution :

- des propriétés mécaniques du sol support ;
- des caractéristiques d'interface. Le comportement des interfaces entre couches de chaussées a une très grande incidence sur la durée de vie des chaussées ;
- des propriétés thermomécaniques des matériaux liées au vieillissement et à la fatigue. Si quelques relations traduisant l'évolution des modules des matériaux bitumineux existent, l'effet du vieillissement sur les performances en fatigue est aujourd'hui mal connu ;
- des propriétés thermomécaniques des matériaux liées à une combinaison d'infiltrations d'eau, associées avec l'effet des cycles de gel/dégel.

Il est donc nécessaire d'améliorer l'état des connaissances dans ces domaines pour une meilleure compréhension des conditions conduisant à de telles dégradations.

### Modèle élastique insuffisant

Les calculs de structures de chaussées sont réalisés avec un modèle élastique, isotrope, homogène linéaire multicouche, comme lors du dimensionnement. Ce modèle n'est plus très réaliste dans le cas d'une chaussée présentant des fissures ou des interfaces détériorées. Une modélisation plus réaliste des chaussées anciennes (notamment celles présentant des dégradations internes) nécessite de mettre au point un modèle de calcul pour les chaussées fissurées. Des modèles de type éléments finis ou analytiques plus simplifiés (modèles multicouches) peuvent être utilisés pour calculer les états de contraintes en présence d'une fissure, et définir des critères de propagation de fissures.

Par ailleurs, on peut s'interroger sur la validité de la loi de Miner, pour le cumul des dommages.

## 2.4.2 Méthodes de mesure et d'auscultation

Cinq sujets majeurs sont identifiés en ce qui concerne les verrous scientifiques et techniques qu'il importe de lever dans les prochaines années.



### Relevés de dégradations

Le relevé des dégradations peut aujourd'hui être amélioré pour s'adapter au contexte en tirant bénéfice des outils automatisés qui apparaissent. Ceci nécessite de revoir l'ensemble de la chaîne depuis la définition des dégradations à relever selon le contexte et les objectifs jusqu'à la conversion en indicateur pour intégration dans les systèmes de gestion. Deux points clés de cette évolution seront la mise en cohérence des informations recueillies entre anciennes et nouvelles méthodes et l'évaluation de la qualité des données délivrées par les différents appareils.

### Déflexions

La mesure de déflexion s'utilise dans les trois contextes d'auscultation suivants : suivi de réseau, caractérisation d'un tronçon ou d'une section témoin. Les principaux verrous se situent sur l'utilisation de la mesure sur des sections témoins ou des tronçons.

L'utilisation des bassins de déflexion complets devrait permettre de dégager des indicateurs plus sensibles à l'état de dommage de la chaussée que la déflexion maximale et le rayon de courbure notamment sur des réseaux structurants où le niveau de déflexion maximale est faible.

Les matériels opérationnels utilisés actuellement en France ne permettent pas un suivi exhaustif réel de l'ensemble d'un réseau, en raison des vitesses de mesure faibles (3 à 5 km/h).

### RADAR

La mesure RADAR permet de détecter avec une bonne fiabilité les couches de nature différentes (bitumineuses, traitées aux liants hydrauliques, non traitées) et leurs interfaces, les variations d'épaisseurs de ces couches et leurs épaisseurs globales (supérieures à 4 cm) et la présence de canalisations dans ou sous la chaussée.

Les points d'amélioration sur lesquels il est utile de travailler sont les suivants :

- ▶ interprétation des données d'interface (décollement) ;
- ▶ caractérisation des couches de surface (couches minces) : il s'agira en particulier de diminuer l'épaisseur des couches détectables et d'améliorer la distinction des couches de même nature : enrobé/enrobé ;
- ▶ rapidité d'exploitation et d'interprétation : effectivement, aujourd'hui, la mesure RADAR génère une quantité importante d'informations dont l'exploitation nécessite un temps important et une technicité pointue. Ces deux points doivent être améliorés afin de faciliter le recours à la mesure RADAR.

### Méthode par propagation d'ondes

Les développements technologiques en matière de mesure mettent aujourd'hui à disposition des capteurs ou des appareils permettant l'application des techniques de propagation d'ondes dans le domaine des chaussées. Il est nécessaire de reprendre les principes physiques des différentes méthodes pour définir leur potentiel d'application à l'auscultation des chaussées. Ceci passe par exemple par l'évaluation du principe des nouveaux matériels développés, puis du matériel lui-même pour une adaptation au contexte (matériel impact écho, Ultrasonic Pulse Echo, système SASW ...).

### Gestion des données et historique des interventions

L'arrivée de nouveaux matériels à grand rendement (déflexions, imagerie laser appliquée à la fissuration ou aux défauts de surface) ainsi que l'instrumentation interne des chaussées vont générer des téraoctets de données, qu'il faudra structurer, analyser, exploiter et conserver avec comme objectif à moyen terme le développement d'une capacité d'autodiagnostic de la chaussée. Ceci pose le problème de l'utilisation des données, de la transition avec les méthodes et indicateurs actuels, des adaptations à faire tant sur l'interprétation des résultats que sur leur utilisation y compris dans les systèmes de décision automatisée. A l'échelle du réseau, on aura une grande quantité de données à stocker et à analyser sauf si on les traite en temps réel, mais alors dans ce cas, les données conservées risquent de ne pas être suffisantes pour revenir à l'échelle locale.

Enfin, à ces cinq sujets majeurs identifiés, il faudra ajouter un thème supplémentaire, même s'il se situe en marge du sujet et concerne plus largement l'ensemble des opérations de construction, d'entretien et de suivi des chaussées, qui est celui de la qualité des mesures et de la qualification des appareils et des opérateurs.



Un groupe de travail spécifique pour la labellisation des matériels de mesures a été mis en place au sein de l'IDRRIM. Il conviendra d'harmoniser les développements menés notamment au titre des cinq points précédents avec les méthodes et exigences définies par cette commission.

### 2.4.3 Méthode de dimensionnement des chaussées neuves

La démarche de la méthode française de dimensionnement des chaussées présente plusieurs limitations :

- ▶ certains mécanismes de dégradation ne sont pas pris en compte, tels que la fissuration par le haut observée sur certaines chaussées bitumineuse, l'orniérage des couches de surface, ou la dégradation (fatigue ?) des interfaces entre couches ;
- ▶ les nouvelles silhouettes des charges à l'essieu ne sont pas intégrées : tridem à pneus larges, 44 tonnes, etc. ;
- ▶ pour les chaussées à assises en matériaux traités aux liants hydrauliques, l'un des principaux modes d'endommagement, qui est la remontée et la dégradation progressive des fissures de retrait, n'est pas pris en compte ;
- ▶ le dimensionnement est effectué pour une température constante, appelée température équivalente. Cette température « équivalente » est définie comme la température constante qui conduit au même endommagement par fatigue que les variations réelles de température auxquelles la chaussée est soumise. Toutefois, en pratique, cette température équivalente n'est pratiquement jamais calculée, et est considérée égale à 15 °C ;
- ▶ le changement climatique n'est pas encore intégré ;
- ▶ les mécanismes de gel à caractères répétitifs sur une profondeur moins importante n'ont pas été pris en compte.

Un des principes de base de l'approche française de dimensionnement est que les calculs sont effectués avec les propriétés mécaniques des matériaux telles que déterminées à la construction, et aucun vieillissement ou évolution à long terme des matériaux n'est pris en compte. Ceci rend difficile l'utilisation de la méthode pour recalculer la durée de vie résiduelle d'une chaussée. La correspondance entre les calculs et les durées de vie réelles observées sur chaussées est assurée par l'introduction de *coefficients de calage*, qui dépendent du type de matériau utilisé en couches d'assise.

Toutefois, les coefficients de calage utilisés aujourd'hui sont toujours ceux du guide de dimensionnement des structures de chaussées de 1994 (SETRA, LCPC, 1994). Il serait sans doute utile, aujourd'hui, de réévaluer ces coefficients, compte tenu des évolutions observées à la fois au niveau des techniques routières, et de la composition et de l'agressivité du trafic.

Enfin, on peut ajouter que la méthode de dimensionnement actuelle ne sait pas prendre en compte les modes de comportement et de dégradation de certains matériaux. C'est le cas des matériaux bitumineux à froid (graves émulsion), pour lesquels aucun critère de dimensionnement n'est appliqué (le critère classique de dimensionnement en fatigue n'est pas applicable).

### 3 PROGRAMME DE RECHERCHE

3.1	THEME 1 – MECANISMES DE DEGRADATION DES CHAUSSEES.....	18
3.1.1	Thème 1.1 – Retour d’expérience sur les mécanismes de dégradation des chaussées.....	18
3.1.2	Thème 1.2 – Sol support et assainissement (chaussées souples).....	20
3.1.3	Thème 1.3 – Interfaces.....	21
3.1.4	Thème 1.4 – Fatigue et vieillissement des matériaux.....	23
3.1.5	Thème 1.5 – Dégradations hivernales.....	29
3.2	THEME 2 – CARACTERISATION DE L’ETAT DU RESEAU.....	30
3.2.1	Thème 2.1 – Retour d’expérience sur la connaissance de l’état du réseau.....	31
3.2.2	Thème 2.2 – Méthodes de mesure et d’auscultation <i>in situ</i> .....	32
3.2.3	Thème 2.3 – Indices structurels.....	36
3.3	THEME 3 – EVALUATION DE LA DUREE DE VIE RESIDUELLE.....	37
3.3.1	Modèles de dégradation des structures.....	39
3.3.2	Aspects probabilistes.....	40
3.3.3	Cas des couches de surface.....	42

#### 3.1 THEME 1 – MECANISMES DE DEGRADATION DES CHAUSSEES

La première étape, dans l’évaluation de la durée de vie de chaussées anciennes, consiste à bien comprendre et évaluer les différents mécanismes de dégradation des structures de chaussées, pour ensuite proposer des modèles, permettant de décrire ces phénomènes de dégradation et de prévoir leur évolution. L’état de l’art, réalisé dans l’étude de faisabilité du projet DVDC, a permis d’identifier plusieurs modes de dégradation principaux, dont l’étude est jugée prioritaire :

- ▶ Les variations de portance, et l’orniérage des matériaux non traités, liés notamment aux conditions hydriques ;
- ▶ L’endommagement des interfaces ;
- ▶ Le vieillissement des matériaux bitumineux ;
- ▶ Les phénomènes de fatigue et de fissuration ;
- ▶ L’effet des cycles de gel/dégel.

L’étude de ces différents mécanismes de dégradation s’appuiera sur un retour d’expérience, visant à définir et quantifier les principaux modes de dégradation observés, pour les différentes techniques de chaussées, et pour différents types de réseaux (autoroutes, routes nationales et départementales). Celui-ci permettra également de sélectionner des sections de chaussées, présentant différents niveaux de dégradations, dont les données pourront servir de support aux études réalisées dans le projet.

Ce premier thème comportera donc 5 sujets de recherche, dont le contenu est détaillé ci-dessous.

##### 3.1.1 Thème 1.1 – Retour d’expérience sur les mécanismes de dégradation des chaussées

###### 3.1.1.1 Problématique

La durée de vie d’une chaussée est en général évaluée par une méthode de dimensionnement, qui permet de calculer les sollicitations dans la structure de chaussée, puis d’appliquer des lois de fatigue, ou de cumul de déformations des matériaux, qui permettent d’évaluer le nombre de chargements conduisant à la rupture de la chaussée, et donc d’estimer sa durée de vie. Les méthodes de dimensionnement sont élaborées à partir

d'hypothèses différentes selon qu'il s'agit de chaussées à faible trafic, de chaussées à fort trafic, de chaussées aéroportuaires ou portuaires.

En France, la méthode actuelle de dimensionnement des chaussées routières est appliquée depuis plus de 20 ans, et le retour d'expérience réalisé dans DVDC visera à le confronter à la méthode de dimensionnement de référence, avec les modes de dégradations effectivement observés en fonction des sollicitations (trafic, charges, climat) et des types de structure. Dans cette approche française, le dimensionnement est basé sur deux critères principaux : la rupture par fatigue des matériaux liés (bitumineux ou traités aux liants hydrauliques) et la déformation du sol support, associés à des critères comme le collage des couches par exemple et à un risque statistique. Il est important de vérifier si ces critères sont pertinents, et s'il existe d'autres modes de dégradation importants, qui ne sont pas pris en compte correctement aujourd'hui. Le retour d'expérience peut également permettre de réévaluer les coefficients de calage de la méthode de dimensionnement.

A titre d'exemple, une étude de ce type a été réalisée sur le réseau routier breton. Elle est décrite dans le mémoire de thèse de T. Froment (juin 2007) : « Bilan du comportement des chaussées du plan routier breton – Comparaison par rapport aux hypothèses de dimensionnement ». Elle a porté sur différents types de structures de Bretagne : chaussées bitumineuses, chaussées mixtes, chaussées semi-rigides et concerne un réseau de 956 km échantillonné avec 226 sections de plus de 20 ans construites et entretenues entre 1975 et 1995 avec des classes de trafic T1/T0. Cette étude a permis de faire apparaître :

- ▶ les durées de vie réelles des différents types de chaussées, ainsi que les entretiens réalisés (nature et fréquence) ;
- ▶ les écarts entre durée de vie calculée et observée, et d'analyser les causes de ces écarts (hypothèses de dimensionnement non réalistes, mécanismes de dégradation différents de ceux pris en compte).

La méthodologie présentée, après examen critique, est adaptée au projet DVDC. Par contre, elle devra être élargie aux chaussées à faible trafic.

### 3.1.1.2 Structures de chaussée étudiées

Les réseaux concernés par le projet DVDC sont :

- a. Chaussées souples et chaussées à faible trafic
- b. Chaussées bitumineuses
- c. Chaussées semi-rigides
- d. Chaussées béton
- e. Chaussées urbaines (qui rassemblent les cas précédents, mais qui seront traitées de façon spécifique)

Dans chaque cas, il faudra :

- définir un type de réseau, un type de structure (ou plusieurs), un niveau de trafic et un climat de référence. Les réseaux seront choisis pour disposer d'un échantillon cohérent avec l'objet de l'étude ;
- définir les données nécessaires pour chaque section (structure, trafic, entretiens réalisés, données d'auscultation...). Le niveau des données disponibles va dépendre de la connaissance et du suivi des réseaux par le gestionnaire. Ils seront choisis avec des maîtres d'ouvrages, des collectivités ou des concessionnaires de réseaux autoroutiers qui participent au projet. Il serait souhaitable d'intégrer également une ou deux expérience(s) étrangère(s) ;
- l'étude combinera l'analyse des données existantes avec le recueil éventuel de données complémentaires, d'avis des gestionnaires et d'experts. Dans certains cas, il sera possible de faire des mesures directes sur le réseau pour harmoniser les données d'entrée ;

On pourra s'appuyer sur les données des 22 sections SHRP qui avaient été bien documentées au début des années 90.

### 3.1.1.3 Choix des experts

Pour chaque type de réseau, un ou deux experts seront chargés de l'analyse des sections, suivant la méthodologie définie. Le choix des sections à étudier se fera avec les différents maîtres d'ouvrage présents dans le projet, en essayant de prendre en compte des régions et zones climatiques différentes.

Une liste d'experts pressentis (qui sera complétée au cours du montage du projet) est donnée ci-dessous :

- a. Chaussées souples et chaussées à faible trafic : Hugues ODEON
- b. Chaussées bitumineuses : Rolf KOBISCH
- c. Chaussées semi-rigides : Jean-Pierre MARCHAND
- d. Chaussées béton : Jean-Pierre MARCHAND
- e. Chaussées urbaines : Lionel GRIN

### 3.1.1.4 Livrables

#### Base de données de sections de chaussées :

- Caractéristiques des sections (type de réseau, trafic, type de plateforme, climat) ;
- Techniques de construction (méthode de dimensionnement, type de renforcement, structure, matériaux) ;
- Age des structures ;
- Entretiens (méthode de suivi, données d'auscultation, indices de qualité, type d'entretien, fréquence, budget, coût des techniques) ;

#### Bilan de comportement des sections, par technique :

- Mécanismes d'endommagement, comparaison avec les hypothèses de dimensionnement ;
- Efficacité de l'entretien ;
- « Success stories ».

## 3.1.2 Thème 1.2 – Sol support et assainissement (chaussées souples)

Aujourd'hui, la prise en compte des sols supports de chaussées et des graves non traitées (GNT) dans la méthode française de dimensionnement, ou de renforcement est faite en considérant un comportement élastique linéaire de ces matériaux ; de plus, les valeurs de modules d'élasticité utilisées (notamment pour les GNT) ne sont pas déterminées à partir d'essais mécaniques, mais de critères empiriques de classification des matériaux, basés sur des paramètres tels que la granulométrie, l'argilosité des fines, la dureté des granulats. Les critères d'orniérage utilisés pour le dimensionnement sont également très empiriques : ils définissent une valeur limite de déformation verticale, qui est uniquement fonction du niveau de trafic, et ne dépend pas des caractéristiques du matériau. De plus, les modèles utilisés ne prennent pas en compte l'état hydrique. Ils ne permettent donc pas d'évaluer l'influence de variations de teneur en eau sur le comportement mécanique des sols ou des GNT. L'objectif des études menées dans cette partie est de :

- proposer (notamment à partir de la bibliographie) des modèles plus réalistes pour la prise en compte du comportement des matériaux non liés dans la modélisation des structures de chaussées ;
- tester ensuite des méthodes en laboratoire (essais triaxiaux, pour les GNT) et *in situ* (déflectomètre portable, pour les sols) pour la détermination des paramètres de ces modèles de comportement mécaniques, puis de valider les modèles par comparaison avec des mesures *in situ* ou des essais en vraie grandeur.

### 3.1.2.1 Actions de recherche

Pour atteindre les objectifs ci-dessus, trois actions de recherche sont définies :



- ▶ la réalisation, par EGIS, d'un **état de l'art** international sur les approches de dimensionnement et de modélisation des chaussées souples, et des matériaux non traités ;
- ▶ **la définition d'un modèle de caractérisation des sols à partir d'essais in situ** : l'objectif de ce projet, proposé par Rincent BTP, est de définir un modèle simple basé sur la caractérisation in-situ du comportement dynamique des sols supports à partir d'essais réalisés avec un déflectomètre portable. Cet appareil permet de solliciter la plate-forme dans une gamme d'amplitudes et de fréquences définies en fonction des conditions réelles de sollicitations des plateformes ;
- ▶ **la définition d'un modèle pour les GNT, à partir d'essais triaxiaux** : le but de ce projet, qui associe l'INSA de Strasbourg et l'IFSTTAR, est d'arriver à une meilleure prise en compte du comportement des graves non traitées dans le calcul ou le dimensionnement des chaussées souples. L'étude comprendra :
  - des essais triaxiaux et des mesures de courbes de succion en laboratoire, visant à caractériser le comportement mécanique et hydrique des GNT. A partir de ces essais, une modélisation du comportement cyclique des GNT, prenant en compte l'état hydrique (la succion), sera proposée ;
  - des essais en vraie grandeur, réalisés au moyen des simulateurs de trafic FABAC de l'IFSTTAR, visant à valider la modélisation proposée, par comparaison avec des essais sur structures de chaussées à faible trafic, instrumentées (2 planches d'essais, avec des conditions hydriques différentes).

### 3.1.2.2 Livrables

- Etat de l'art international sur les approches de modélisation des GNT et des sols supports de chaussées, et de dimensionnement des chaussées souples ;
- Approche de modélisation des sols supports de chaussées à partir d'essais *in situ* au déflectomètre portable ;
- Modèle pour la prise en compte des GNT dans le dimensionnement des chaussées, validée par des essais en vraie grandeur.

### 3.1.3 Thème 1.3 – Interfaces

Pour la plupart des types de structures de chaussées, leur durabilité est liée à l'hypothèse d'un bon collage entre leurs différentes couches. En effet, du point de vue fonctionnement mécanique de la chaussée, l'état de l'interface conditionne très fortement la répartition des contraintes et des déformations dans chaque couche, et donc les niveaux maximum de sollicitation dans la structure. Lorsque les différentes couches de matériaux restent parfaitement collées entre elles, la rigidité de la structure est maximale, et les déformations et contraintes de traction les plus élevées (donc les plus préjudiciables) apparaissent à la base de la structure. Si une ou plusieurs interfaces sont décollées, la rigidité de la structure se trouve réduite, et des déformations ou contraintes de traction importantes peuvent se développer à la base des couches décollées, réduisant considérablement leur durée de vie en fatigue. En matière de dimensionnement, les méthodes actuelles ne prévoient que des conditions extrêmes (collée ou glissante) sur toute leur durée de vie (ou une partie).

Le comportement réel des interfaces et leur durabilité jouent donc un rôle essentiel dans la durée de vie d'une chaussée. Au sein du PN, deux approches seront testées pour évaluer le comportement des interfaces *in situ* : des essais de contrôle non destructif (ECND) et/ou des essais dits destructifs. L'intérêt des ECND est de permettre un nombre de points de mesure élevé, et un suivi dans le temps du collage de la chaussée sans détérioration, mais la quantification de la qualité du collage est plus délicate. L'essai destructif nécessite un carottage sur chaussée, mais peut quantifier le collage, dans la limite de sa pertinence.

### 3.1.3.1 Caractérisation des interfaces par essais non destructifs

Différentes techniques d'imagerie et de mesure de la réponse vibratoire seront évaluées. Une collecte de mesures a déjà été initiée par l'IFSTTAR depuis 2011 par trois types d'interaction onde-matière (électromagnétique, sonore et sismique) sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR, sur une section présentant différents types de défauts d'interface. L'exploitation des mesures réalisées sur le manège a permis de montrer la pertinence des différentes méthodes pour détecter des interfaces dégradées. Le PN propose la poursuite de cette expérimentation encore en place afin d'atteindre un niveau de dégradation plus important, avec la réalisation de mesures à différents niveaux de chargement (400 000, 500 000, 600 000 passages d'essieux équivalents).

Outre les mesures RADAR, UPE (ultrasons) et Colibri (ondes mécaniques), réalisées par l'IFSTTAR, d'autres systèmes d'auscultation, proposés par d'autres partenaires du projet, pourront être testés sur le site test.

Ces travaux conduiront à développer des méthodologies d'exploitation et d'interprétation des signaux afin de localiser les défauts d'interface et leur gravité. Des indicateurs structurels seront également déterminés.

Le PN bénéficiera également d'un travail de thèse en cours de lancement sur cette thématique à l'IFSTTAR (détection de défaut à partir de mesures de déflexions : FWD ou déflectographe ou poutre Benkelman). Une valorisation dans des journaux scientifiques mais aussi dans des congrès internationaux est prévue.

### 3.1.3.2 Caractérisation des interfaces par essais destructifs

Un projet de norme (pr EN 12697-48) est actuellement en cours de rédaction, pour les matériaux bitumineux. Il propose sept méthodes d'essais dont trois normatives (par traction, cisaillement ou torsion). Ces trois méthodes sont basiques, destructives et monotones. L'analyse de leur pertinence en laboratoire a été menée par l'USIRF, en collaboration avec l'ESTP et l'ENSAM (publication RGRA juillet 2015 n°928). Une des conclusions est que l'essai de torsion manuel proposé dans la pré-norme 2015, présentant l'avantage d'être réalisable sur terrain, n'est pas maîtrisable dans l'état actuel. Par ailleurs, la température ressort comme étant le paramètre le plus influent sur les résultats d'essais. Le développement d'un prototype d'essais *in situ*, maîtrisant les sollicitations et conditions d'essais, est alors envisagé. Les modalités devront être parfaitement définies (vitesse de chargement, couple, température) ainsi que les limites d'utilisation.

La définition et validation du cahier des charges se réalisera au sein d'un groupe de travail en fonction des expériences de chaque partenaire (Université de Limoges, GEMH-GCD, Pérennise Chaussées MC, ESTP, ENSAM, Eurovia, USIRF, EIFFAGE Travaux Publics). Ce travail permettra de bien définir les possibilités pratiques de l'outil (torsion pure ou couplage, gamme de mesure, automatisation/ acquisition des mesures ...).

Le projet se déroulera en plusieurs étapes :

- étude de l'appareil *in situ* : Evaluation du cahier des charges rédigé par Limoges et amendement par l'ensemble des partenaires. Puis, phase de conception du système, réalisation des plans et fabrication du dispositif :
- qualification en termes de métrologie, (fiabilité, sensibilité) par comparaison avec des essais en laboratoire avec une presse axiale de torsion de 100kN ;
- qualification *in situ* sur une planche expérimentale (3 x 50m) conçue à cet usage, permettant de tester différents enrobés avec différents modalités de collage (sans couche d'accrochage, teneurs variables en émulsion, nature de l'émulsion, support sale, rupteur d'émulsion...), à différentes saisons. Des ECND seront réalisés avant l'intervention afin de compléter l'expérimentation. Il peut aussi être envisagé de réaliser des essais sur les structures du manège après la réalisation des essais non destructifs.

En fonction des moyens alloués, des essais à chargements répétés pourront également être réalisés, afin de qualifier l'interface et son évolution dans le temps, par des essais plus proches de la réalité terrain mais non réalisables *in situ*.

L'exploitation des résultats permettra de qualifier non seulement la contrainte maximale mais aussi la raideur du matériau d'interface. Ce travail devrait permettre de définir des seuils acceptables de résistance, ainsi que

des recommandations pour la réalisation des essais *in situ*, notamment des limites en fonction des conditions extérieures (température trop élevée). L'essai ne sera pas systématiquement destructif ; il peut être envisagé, d'arrêter l'essai lorsqu'une valeur minimale de résistance en torsion, garantissant un collage suffisant, est atteinte, sans aller jusqu'à la rupture.

Ce travail s'appuiera sur des stages, et sur le travail d'enseignant-chercheur et d'ingénieurs sur 3 ans. La planche expérimentale pourra être réalisée par des entreprises partenaires du projet. Ce travail sera valorisé par une publication et une demande de modification de la norme en projet.

Un séminaire sera organisé sur cette thématique (cf. §4).

### 3.1.3.3 Caractérisation des interfaces des structures en béton de ciment (BAC ou BC goujonné) sur Grave-bitume

En complément des travaux précédents, une étude spécifique sera menée pour vérifier et valider, sur d'anciennes chaussées (au moins 10 ans d'âge), la pertinence des hypothèses de collage retenues dans le cadre de la méthode de dimensionnement des chaussées, en s'appuyant sur des études menées conjointement par le SPECBEA (Syndicat Professionnel des Entrepreneurs de Chaussées en Béton et d'Equipements Annexes) et le Cerema.

Une recherche bibliographique sur le collage *in situ* et en laboratoire des chaussées en béton de ciment sur Grave-bitume (BCg/GB) ou matériaux bitumineux sera entreprise. Elle portera sur des publications internationales, pour confirmer les attentes dans ce domaine, mais aussi sur le référencement de chantiers BCg/GB en France susceptibles d'être investigués. L'évaluation technique de cette campagne a pour objectifs :

- ▶ d'évaluer le comportement de cette structure afin de confirmer son inscription lors de la révision de la norme de dimensionnement de chaussées routières neuves NF P 98-086 ;
- ▶ de valider les hypothèses de dimensionnement actuellement retenues tant au niveau des paramètres de dimensionnement : conditions de collage, coefficient de calage  $k_c$  et de discontinuité  $k_d$  - qu'au niveau des dispositions constructives : largeur limite et épaisseurs.

Des essais d'ovalisation (réalisés dans le cadre du chantier de la déviation de St Pierre en Mayenne par le LR Angers du Cerema) confirmeront ou non l'aspect collé ou non collé et pourront conduire à une modification des conditions d'interfaces entre le BCg et la fondation en Grave bitume. Parallèlement le recours au FWD (Falling Weight Deflectometer) au droit des joints permettra d'évaluer le transfert de charge entre les deux dalles consécutives et par là-même de réévaluer la valeur du coefficient  $k_d$  retenu dans la méthode de dimensionnement.

Route et Conseil assurera la coordination, le pilotage de la fiche de recherche ainsi que la rédaction des rapports. Le Specbea apportera via ses membres les compétences requises et les retours d'expériences pour mener à bien cette action de recherche.

### 3.1.3.4 Livrables

- Comparaison de différentes méthodes ECND et appareils d'auscultation pour la caractérisation des interfaces. Définition d'indicateurs structurels, constitution d'une base de données de signaux associés ;
- Proposition d'un essai destructif *in situ*, avec contrôle des modalités d'essais (vitesse, rotation, température) et *in fine* proposition d'un mode opératoire ou une annexe nationale pour la qualification *in situ* en torsion de l'interface ;
- Caractérisation des structures BAC ou BC goujonné /Grave-bitume : données relatives aux interfaces à intégrer dans les méthodes de dimensionnement, pour valider le comportement à long terme des chaussées en béton de ciment ;

## 3.1.4 Thème 1.4 – Fatigue et vieillissement des matériaux

L'objectif de ce sujet est d'étudier le comportement de matériaux bitumineux anciens, prélevés *in situ*, afin d'évaluer leur état de vieillissement et d'endommagement. L'objectif est à la fois de proposer des essais



innovants permettant de caractériser ces matériaux anciens et des modèles permettant de prédire l'évolution de leurs propriétés mécaniques. Les études porteront à la fois sur la caractérisation des liants, et des enrobés, par des approches classiques et innovantes.

Ce sujet est très important pour l'évaluation des chaussées anciennes et l'estimation de leur durée de vie. Pour le traiter, des méthodes innovantes nécessitant des développements « amont » sont proposées dans le cadre de DVDC.

**Il est donc envisagé que ce sujet fasse l'objet d'une demande de financement auprès de l'ANR<sup>10</sup>, dans le cadre d'un projet en lien étroit avec le projet national DVDC. Le projet devrait être déposé en 2015, en fonction du calendrier défini par l'ANR.**

**Les principaux objectifs de ce projet sont présentés ci-dessous.**

#### 3.1.4.1 Objectifs généraux du projet ANR

Lorsqu'on cherche à évaluer la durée de vie résiduelle d'une chaussée ancienne, ou à dimensionner un renforcement, on se trouve confronté au problème de l'estimation des performances mécaniques «résiduelles» des matériaux qui la composent. Pour cela, des carottages sont souvent réalisés pour évaluer, visuellement, l'état des matériaux de l'ancienne chaussée (fissuration décollement des interfaces), mais ces matériaux sont rarement caractérisés sur le plan mécanique. On connaît donc assez mal, aujourd'hui, l'influence du vieillissement sur les performances mécaniques (module, fatigue, résistance à la fissuration) des matériaux bitumineux, et on manque également d'indicateurs pertinents pour quantifier le niveau de vieillissement de ces matériaux.

Le projet sera basé sur l'analyse de cas réels de chaussées bitumineuses anciennes, présentant différents niveaux de vieillissement, et aura pour objectifs :

- d'analyser de manière détaillée les propriétés mécaniques et physico-chimiques des liants et des enrobés, d'une part provenant de ces anciennes chaussées, et d'autre part vieillis en laboratoire, afin de mieux comprendre l'évolution de leurs propriétés avec le vieillissement ;
- d'essayer de proposer de nouvelles méthodes de caractérisation des liants et des enrobés, permettant d'évaluer leur niveau de vieillissement et d'endommagement par des méthodes peu intrusives (méthodes d'évaluation non destructives pour les enrobés, analyses rhéologiques pouvant être réalisées sur de petits échantillons de liant) ;
- de proposer des modèles permettant de prédire les performances mécaniques et la durée de vie des matériaux vieillis.

#### 3.1.4.2 Choix de sections à étudier

Le choix des sections de chaussées à étudier s'appuiera sur les retours d'expérience sur les mécanismes de dégradation, réalisés dans le sujet 1.1 de DVDC, pour les chaussées bitumineuses. L'objectif sera de sélectionner environ une dizaine de sections de chaussées, d'âge supérieur à 20 ans, présentant différents niveaux de dégradation, et provenant, si possible, de différentes régions climatiques. Ces sections devront avoir une structure homogène, et être bien documentées (suivi par des essais d'auscultation). Plusieurs zones de prélèvement de matériaux, présentant des niveaux de dégradation différents, seront définies sur chaque section. Pour chaque section, des études seront menées en parallèle sur les enrobés et les liants extraits, par les partenaires du projet cités en 3.1.4.7 selon leurs expertises.

#### 3.1.4.3 Caractérisation du vieillissement des liants

Le premier volet du projet portera sur l'étude des liants extraits des différentes sections. Ces liants feront l'objet d'une caractérisation par :

- des essais d'identification classique (pénétrabilité, Température Bille Anneau) ;
- des essais physico-chimiques ;

---

<sup>10</sup> Agence nationale de la Recherche – [www.agence-nationale-recherche.fr/](http://www.agence-nationale-recherche.fr/)

- des essais rhéologiques (Essais de module complexe en traction compression ou en cisaillement) ;
- des essais de fatigue et de fissuration à froid.

Si cela s'avère possible (échantillons disponibles), des caractérisations des liants « neufs » ayant été utilisés pour la construction seront également réalisées.

En plus de ces caractérisations classiques, l'IFSTTAR a développé une méthode innovante qui permet de traduire les propriétés rhéologiques des bitumes en termes de distribution apparente des masses moléculaires et d'avoir ainsi accès à une image de la structure colloïdale des liants (la «  $\delta$  méthode »). Cette méthode est intéressante car elle dérive directement d'une mesure des propriétés mécaniques (en viscoélasticité linéaire) et donne accès à une visualisation globale de l'état du matériau, par opposition aux critères basés sur un état mécanique dans des conditions de températures et de temps de sollicitation précis (comme c'est le cas aux US pour les « PG grade »). De plus, les premiers résultats montrent que la «  $\delta$  méthode » est très sensible à l'état de vieillissement en mettant en évidence le mécanisme d'agglomération des asphaltènes. La déstabilisation de la structure colloïdale, qui est au cœur de la fragilisation des liants, pourrait donc être utilisée aisément comme un critère qui permettrait de définir « l'état de santé » du matériau. La même méthode de caractérisation pourrait également être appliquée directement à l'évaluation des propriétés rhéologiques des enrobés. L'étude des liants par cette méthode fera l'objet d'un sujet de thèse, proposé dans le projet ANR.

A partir de ces différentes méthodes de caractérisation, on cherchera à établir des liens entre les différentes propriétés des liants, et les dégradations observées sur chaussées, afin d'identifier des indicateurs pertinents, permettant d'évaluer l'état de vieillissement des liants et leur durée de vie résiduelle.

Ces études sur les liants seront complétées par des études sur les enrobés, afin de bien comprendre les liens entre performances du liant et de l'enrobé. L'intérêt des études de caractérisation sur liant, telles que la «  $\delta$  méthode » notamment, est qu'elles ne nécessitent que de petits prélèvements (quelques grammes de liant) et qu'elles sont donc beaucoup moins intrusives et plus faciles à mettre en œuvre que des études de caractérisation mécanique des enrobés, qui nécessitent de prélever des volumes de matériaux beaucoup plus importants (plaques ou carottes de grand diamètre, permettant ensuite la découpe d'éprouvettes pour essais de fatigue et de module par exemple).

#### 3.1.4.4 Evolution des performances mécaniques des enrobés

### Interprétation des essais de fatigue et comparaison à la base de données du manège de fatigue de l'IFSTTAR Nantes

La revue bibliographique réalisée dans le cadre du projet, en particulier celle relative à l'analyse des phénomènes d'autoréparation (cf. annexe 6.2), a montré que les essais de fatigue en laboratoire présentent des effets biaisants non négligeables, notamment ceux liés aux sollicitations continues imposées sans temps de repos. Ces effets biaisants peuvent être à l'origine des écarts relevés entre les durées de vie estimées à partir des essais de laboratoire et celles observées expérimentalement par l'apparition de fissurations sur chaussées réelles dues au phénomène de fatigue (de la Roche et al., 1994 ; Nunn, 1994).

Afin d'obtenir une meilleure corrélation entre les essais de fatigue en laboratoire et l'apparition des fissures sur chaussées, EIFFAGE Travaux Publics se propose de :

- réaliser une étude bibliographique :
  - o recensement des lois de fatigue des matériaux par grande famille (bitumineux, MTLH, composites, ...) ;
  - o mode et méthode de mesure de la loi de fatigue (France et International) ;
  - o mode de dégradation réel (fatigue ou non) des chaussées ;
- réaliser des essais de fatigue en laboratoire sur des matériaux de chaussée représentatifs de structures de chaussées de référence et les analyser avec une méthode innovante par comparaison à la base de données du manège de fatigue de Nantes, publiée dans le n°914-915 de la RGRA en septembre-octobre 2014 à l'occasion de la manifestation des 35 ans du manège (comportement réel d'une structure) organisée par l'IFSTTAR.

L'étude des propriétés mécaniques des enrobés vieilliss associera des essais de résistance à l'eau, de module complexe, de retrait empêché (pour caractériser la fissuration à basse température), et de fatigue. L'objectif sera de relier le vieillissement observé sur les liants avec les différentes performances des enrobés (désenrobage, comportement en fatigue, à froid). Eurovia, en partenariat avec l'ESTP et l'IFSTAR propose de confronter et caler les modes opératoires mis au point avec des échantillons prélevés sur réseau autoroutier en disposant des informations d'âge et de sollicitation.

### Effet du vieillissement sur les performances mécaniques des enrobés (module et fatigue)

Dans cette action de recherche menée par l'entreprise Malet, il est proposé de suivre les étapes de vieillissement d'un enrobé au cours du temps et de mesurer l'évolution du module et d'un critère de fatigue en lien avec le suivi rhéologique des liants extraits. L'étude consistera donc à fabriquer des matériaux enrobés à différents stades de vieillissement, pour confectionner des éprouvettes de laboratoire à l'aide du compacteur de plaque. Sur chaque plaque seront extraites 5 éprouvettes trapézoïdales sur lesquelles seront mesurés le module complexe ainsi qu'un un critère de rupture selon l'essai de fatigue. Le suivi de la rhéologie du bitume après extraction (à partir des éprouvettes trapézoïdales) servira de jalon pour le vieillissement.

Une étude complète du module et de la résistance en fatigue sera effectuée sur les matériaux bitumineux frais et vieilliss afin de pouvoir évaluer avec précision la durée de vie résiduelle en fatigue d'une chaussée ancienne. Le stade de vieillissement souhaité pour évaluer cette durée de vie résiduelle est à définir.

Cette étude permettra de suivre le vieillissement de l'enrobé et d'établir une module résilient au fur et à mesure du vieillissement. Le suivi de cette évolution et la rhéologie du bitume extrait permettra d'établir avec précision une évolution des propriétés mécaniques.

Une maîtrise de cette méthode permettrait *in fine* d'intégrer des phénomènes connexes à la durée de vie d'un enrobé comme l'âge du matériau, l'autoréparation et aboutir à une non linéarité de la loi d'endommagement qui peuvent changer le comportement.

#### 3.1.4.5 Caractérisation par des méthodes non destructives

L'utilisation des méthodes de caractérisation et de contrôle non destructifs est en pleine expansion dans le domaine du génie civil. Parmi ces méthodes, celles basées sur la propagation des ondes mécaniques ont déjà fait leurs preuves sur divers matériaux, notamment le béton. Dans le domaine des chaussées, elles restent encore peu utilisées, mais leur potentiel a été démontré pour l'étude des matériaux bitumineux. Ainsi, il est possible d'identifier certaines caractéristiques mécaniques et d'établir des critères quantitatifs et qualitatifs pour le suivi de la dégradation du matériau. Par exemple, des mesures de la vitesse de propagation et de l'atténuation en laboratoire permettent :

- d'aboutir à une bonne corrélation avec certaines caractéristiques micro-structurelles du matériau (densité, volume des vides, teneur en eau, optimum de bitume) ;
- de mettre en évidence l'anisotropie induite par le mode de mise en œuvre ;
- de fournir, par association à des essais mécaniques, une estimation de la durée de vie en fatigue.

Plus récemment, on note un grand intérêt de recherche pour la détermination des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux notamment les modules complexes et le coefficient de Poisson complexe.

Utilisées en conditions *in situ* sur des structures de chaussées, les ondes ultrasonores permettent :

- de mettre en évidence la présence de fissures verticales dans les couches supérieures et de déterminer leurs profondeurs ;
- d'évaluer la rigidité de ces couches ;
- d'évaluer l'endommagement des joints de chaussées ;
- de caractériser les performances acoustiques de la couche de roulement.



Dans ce contexte expérimental, on envisage dans ce projet deux objectifs : d'une part utiliser un essai de propagation d'ondes ultrasonores (ondes de compression, de cisaillement et de surface) pour la détermination des propriétés mécaniques ( $E^*$ ,  $G^*$  et  $\nu^*$ ), et d'autre part l'étude des phénomènes d'endommagement sous sollicitations diverses par l'enregistrement de l'activité acoustique du matériau. Ces études seront menées dans un premier temps en laboratoire, en associant des sollicitations au moyen d'une cellule triaxiale, avec des mesures de propagation d'ondes ultrasonores et d'émissions acoustiques. Dans un deuxième temps, les mesures par propagation d'ondes seront également évaluées *in situ*. Ces essais seront complétés par un travail de modélisation numérique. Des outils de simulation, développés au GEMH-GCD (Université de Limoges), permettant de générer des maillages éléments finis représentatif de la structure interne des matériaux bitumineux, seront utilisés. Ils permettront de modéliser la structure réelle des matériaux, à partir d'images issues d'outils d'imagerie 2D (et/ou 3D) et de simuler la propagation des ondes dans le milieu, pour une meilleure compréhension des phénomènes dissipatifs, notamment la diffusion de l'onde par interaction avec les hétérogénéités.

#### 3.1.4.6 Etude et modélisation du comportement des matériaux bitumineux endommagés

L'une des difficultés, dans l'évaluation du comportement de chaussées anciennes, et le calcul de solutions de renforcement, tient à la difficulté de prendre en compte de façon réaliste le comportement des matériaux endommagés ou fissurés. Le but de ce dernier volet d'étude est donc de travailler sur la modélisation mécanique de ces phénomènes d'endommagement, par une approche proposée par l'INSA de Strasbourg, utilisant la méthode des éléments discrets (MED), adaptée à la mécanique de la rupture.

Les résultats de fatigue en laboratoire présentent habituellement trois phases distinctes : les deux premières sont associées à l'endommagement des matériaux et la nucléation de fissures, tandis que la phase III se caractérise par la coalescence et la propagation des fissures. Le travail sera mené en deux étapes :

- ▶ la première étape consistera à implémenter dans la MED (PFC3D) une loi d'endommagement par fatigue adaptée aux enrobés bitumineux (basée sur l'approche proposée par D. Bodin, 2002). Les résultats numériques seront confrontés aux résultats d'essais de fatigue en laboratoire en flexion alternée (2 points et/ou 4 points), réalisés à la fois sur matériau neuf (référence), et sur des matériaux anciens, provenant des sections étudiées dans le projet ;
- ▶ la deuxième étape du travail concernera le comportement des matériaux après l'apparition de fissures. La propagation de ces fissures par fatigue est usuellement pilotée par un critère comme la loi de Paris, où l'incrément de longueur d'une fissure est fonction du nombre de cycles de chargement. Des développements théoriques seront nécessaires pour pouvoir coupler les deux lois de comportement, conceptuellement très distinctes (endommagement et propagation de fissures). Des essais de fatigue cyclique sur enrobés, avec des échantillons pré-entaillés, seront utilisés pour étudier la contribution de cette phase de propagation de fissures dans la perte de capacité de la structure testée (essais en flexion 2P et/ou 4P). Un suivi de la propagation des fissures lors des essais sera réalisé ;
- ▶ finalement, la démarche sera appliquée à la modélisation de quelques cas de structures de chaussées endommagées étudiées dans le projet.

#### 3.1.4.7 Partenaires

Le consortium envisagé pour réaliser le programme de recherche de ce projet ANR est constitué par les organismes suivants :

- Eiffage Travaux Publics
- ESTP
- Eurovia
- IFSTTAR
- INSA Strasbourg (laboratoire Icube)
- IREX
- Lhoist
- Malet
- TOTAL

- Université de Limoges (GEMH)

#### 3.1.4.8 Livrables

- Analyse du comportement de matériaux bitumineux provenant de chaussées anciennes (liants et enrobés) – Evaluation du comportement mécanique et physico-chimique – Recherche de relation entre les différentes propriétés étudiées et les dégradations observées sur chaussées ;
- Mise au point d'une méthode innovante de caractérisation de l'état de vieillissement des liants, basée sur une relation entre les propriétés rhéologiques et la distribution apparente des masses moléculaires du liant (travail de thèse). Recherche de relations entre indicateurs issus de cette méthode, et dégradations observées sur chaussées ;
- Mise au point de méthodes non destructives pour l'évaluation de l'état d'endommagement des enrobés (évaluation en labo et in situ, par propagation d'ondes ultrasonores et émissions acoustiques) ;
- Développement d'une approche de modélisation de la fatigue des enrobés bitumineux par une approche couplant modèles d'endommagement et de propagation de fissures. Validation sur des essais de fatigue.

#### **NB : matériaux à faible impact environnemental**

*Les matériaux de chaussées et les procédés de mise en œuvre évoluent en fonction d'exigences techniques et environnementales. Au cours de la période 1980 – 2000, une gamme de matériaux répondant à des besoins de performance (orniérage, bruit, adhérence, etc.) est apparue et leurs propriétés sont prises en compte dans les méthodes de dimensionnement. Au cours de la dernière décennie, les exigences en termes d'impacts environnementaux se sont accrues, ce qui a engendré le développement de nouvelles techniques (ou qui redeviennent d'actualité) : recyclage des matériaux, abaissement des températures de fabrication, techniques à l'émulsion de bitume.*

*Concernant le recyclage, deux thèmes principaux sont à considérer :*

- *le recyclage des enrobés, technique connue depuis plusieurs décennies mais qui connaît un développement important avec la hausse du prix du bitume et une meilleure gestion des ressources. Les entreprises se sont organisées, ont investi dans de nouveaux équipements et se sont fixées des objectifs de recyclage des agrégats d'enrobés dans le cadre de la « Convention d'engagement volontaire »<sup>11</sup>. Ce sujet est traité par le projet national MURE ([www.pnmure.fr](http://www.pnmure.fr)), la recherche ANR IMPROVMURE et à travers plusieurs thèses ;*
- *le recyclage des chaussées en place : c'est une technique ancienne qui a fait l'objet de nombreuses publications ou guides et de recherches récentes (TRACC). Ce sujet ne sera pas traité compte tenu de son ampleur, mais une synthèse bibliographique sera proposée.*

*Concernant l'abaissement des températures, les premiers chantiers avec des enrobés tièdes ou semi-tièdes datent d'une dizaine d'années, durée suffisante pour disposer d'un retour d'expérience. Plusieurs publications traitent ce sujet et un guide IDRRIM est en cours d'élaboration.*

*Une synthèse des différentes études fera le point des propriétés mesurées sur plusieurs chantiers de référence.*

*Enfin, le cas des techniques à l'émulsion ne sera pas traité. Plusieurs études sont en cours, notamment la caractérisation des propriétés structurales des graves-émulsion.*

*A ces aspects techniques, il faut ajouter la dimension « Analyse du cycle de vie » qui concerne tous les matériaux de chaussée et qui est abordée au moyen des outils de référence que sont SEVE et ECORCE.*

<sup>11</sup> Convention d'engagement volontaire des acteurs de conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières, voirie et espace public urbain, 25 mars 2009

### 3.1.5 Thème 1.5 – Dégradations hivernales

Ce sujet a pour objectif d'étudier un mécanisme de dégradation encore mal compris aujourd'hui, et non pris en compte dans les méthodes de dimensionnement, les dégradations hivernales subies par les couches bitumineuses. Elles se caractérisent par la formation rapide de nids de poules, affectant essentiellement les couches de surface. Elles ont été observées en particulier ces dernières années et semblent liées à une combinaison d'infiltrations d'eau, associées avec l'effet des cycles de gel/dégel. Une meilleure compréhension des conditions conduisant à de telles dégradations (caractéristiques des matériaux sensibles à ces phénomènes, conditions climatiques conduisant à leur déclenchement) permettrait de mieux les prévenir. Pour traiter ce sujet, deux axes complémentaires sont proposés :

#### 3.1.5.1 Retour d'expérience sur les dégradations hivernales

En liaison avec les désordres observés sur chaussées suite à des hivers rigoureux, une collecte d'informations sur des chaussées réelles sera réalisée (trafic, structure, dégradations et évolutions). Une première analyse portera sur les désordres observés lors des hivers 2009 à 2011, sur les régions relatives aux DIR Nord (suivi de dégradations en temps réels) et DIR Est (relevés de dégradations). Elle sera complétée par des données collectées auprès des départements de Meurthe-et-Moselle (CD54), de Moselle (CD57) et du Bas-Rhin (CD67). L'analyse de ces dégradations avec si besoin une approche calculatoire par modélisation du mécanisme conduira à une proposition d'interprétation.

#### 3.1.5.2 Etude de l'endommagement des enrobés bitumineux sous des cycles de gel / dégel

En parallèle, un travail de recherche en laboratoire sera mené pour étudier les différents mécanismes de dégradation des enrobés bitumineux sous l'effet de l'eau et des cycles de gel/dégel. L'investigation sera menée sur plusieurs matériaux, en liaison avec les observations sur sites. Afin de simuler en laboratoire l'endommagement dû aux effets de l'eau et du gel, les échantillons seront soumis à des cycles de conditionnement à l'aide de bains thermostatiques, puis soumis à des cycles de gel-dégel.

Le comportement ViscoÉlastique Linéaire (VEL) des matériaux sera caractérisé par le biais d'essais de traction/compression sur éprouvette cylindrique qui permettent de mesurer le module complexe et le coefficient de Poisson complexe sur une large gamme de fréquences et de températures. Le comportement VEL sera modélisé à l'aide du modèle rhéologique 2S2P1D. L'endommagement des enrobés par l'effet de l'eau sera caractérisé et suivi à l'aide de l'évolution des paramètres du modèle 2S2P1D<sup>12</sup> selon l'histoire de conditionnement à l'eau et au gel.

Le comportement en fatigue des enrobés sera également investigué à l'aide d'essais avancés de laboratoire développés à l'ENTPE<sup>13</sup>. Grâce à la méthodologie développée, il est possible d'isoler et quantifier les variations irréversibles du module complexe associées au phénomène de fatigue. Ces analyses permettent de s'affranchir des biais inhérents aux essais accélérés réalisés en laboratoire pour caractériser le phénomène de fatigue sur ces matériaux. La quantification de ces effets biaisants représente une avancée importante pour l'étude de la fatigue. Cette démarche sera utilisée pour étudier l'influence de l'endommagement par l'eau et par les cycles de gel-dégel sur le comportement en fatigue des enrobés.

Les différents résultats dans les deux axes d'étude devraient permettre :

- ▶ de mieux expliquer les mécanismes de dégradations hivernales ;
- ▶ de dégager les paramètres de formulations influents vis-à-vis de la sensibilité à l'eau et aux dégradations hivernales ;
- ▶ d'améliorer les méthodes de calcul de durée de vie des chaussées, grâce aux modélisations proposées ;
- ▶ de proposer des méthodes de réparation adaptées aux dégâts hivernaux.

<sup>12</sup> General "2S2P1D" Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes, Road Materials and Pavement Design Volume 4, Issue 2, 2003

<sup>13</sup> Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat



### 3.1.5.3 Livrables

- Estimation quantitative de l'endommagement subi par les matériaux (variations du module complexe, de la résistance en fatigue) par effet de l'eau et des cycles de gel-dégel (travail de thèse réalisé à l'ENTPE) ;
- Meilleure connaissance des mécanismes de dégradation des structures en période hivernale, amélioration de la méthode de dimensionnement des chaussées neuves sur ces aspects, et proposition d'un mode de réparation adapté.

## 3.2 THEME 2 – CARACTERISATION DE L'ETAT DU RESEAU

Les méthodes d'auscultation des réseaux routiers, et l'interprétation des données d'auscultation, pour définir des indicateurs pertinents constituent l'un des sujets principaux du projet DVDC. Les méthodes d'auscultation sont nécessaires à la fois pour connaître l'état d'un réseau, et permettre une meilleure gestion préventive de celui-ci, et pour réaliser des diagnostics plus fins, à l'échelle d'une section de chaussée, pour évaluer sa durée de vie, ou définir les besoins de maintenance ou de renforcement.

Même si la connaissance du Réseau Routier National (RRN) a été abordée par l'IQRN il y a 20 ans, la démarche reste insuffisante pour caractériser l'état structurel d'un réseau. Ces réseaux routiers ont par ailleurs montré leur fragilité et le risque d'apparition de dégradations pendant et à la sortie de l'hiver.

Pour les réseaux secondaires (département ou communaux), les besoins en termes d'auscultation et de suivi des réseaux sont différents de ceux des réseaux routiers à fort trafic, en termes de méthodes d'auscultation, et d'indicateurs. Ces réseaux demandent un suivi adapté, basé sur des méthodes d'auscultation et de relevé parfois plus simplifiées et moins coûteuses. Aujourd'hui, les pratiques (et les besoins) sont différents d'un maître d'ouvrage à l'autre.

Les méthodes d'auscultation ont par ailleurs évolué ces dernières années ainsi que les appareils de mesure, grâce en particulier à des progrès importants en matière de capteurs, de méthodes de mesure et de traitement informatique des résultats. Il est donc important :

- de faire un état de l'art et une évaluation des nouvelles méthodes d'auscultation qui semblent les plus intéressantes ;
- de faire évoluer la doctrine, en matière de procédures d'auscultation et d'analyse des résultats de mesure ;
- de redéfinir de nouveaux indices structurels, permettant de qualifier l'état des réseaux, pour les besoins de gestion (évaluation des durées de vie, définition des priorités de travaux).

Dans le projet DVDC, il a été décidé de travailler sur plusieurs types de méthodes d'auscultation, qui apparaissent comme les plus prioritaires, pour l'évaluation de l'état structurel des chaussées :

- les relevés des dégradations visibles en surface ;
- l'amélioration de l'interprétation des mesures de déflexion, notamment à l'échelle d'un réseau ;
- l'amélioration de l'utilisation et de l'exploitation des mesures RADAR, notamment pour la détection de décollements d'interfaces, ou d'autres défauts internes des chaussées ;
- l'utilisation d'autres types de méthodes non destructives, pour l'évaluation de l'état structurel, et la détection de dégradations internes des chaussées.

Enfin la définition d'indices structurels pertinents, adaptés à chaque type de réseau, et la proposition de méthodes pour le suivi de leur évolution constituent l'aboutissement de ce thème.

Par ailleurs, les travaux menés dans DVDC ne s'intéresseront pas à l'évaluation de caractéristiques de surfaces telles que la macrotecture, l'adhérence ou le bruit.

Pour parvenir à ces objectifs, la thématique a été organisée autour de trois sujets :

1. Retours d'expérience sur la connaissance de l'état du réseau ;
2. Méthodes de mesure et auscultation *in situ* ;
3. Indices structurels.

### 3.2.1 Thème 2.1 – Retour d'expérience sur la connaissance de l'état du réseau

#### 3.2.1.1 Objectif et partenaires

L'objectif de cette première partie est de bien définir les besoins des Maîtres d'ouvrage en matière d'auscultation et de suivi, pour les différents types de réseaux, en prenant comme point de départ les pratiques actuelles. Cette investigation pourra être menée en s'appuyant sur les documents existants (Etat), les réflexions en cours (telles que l'étude GEPUR – Gestion et Entretien du Patrimoine Urbain et Routier) et par enquête auprès des gestionnaires. Les objectifs principaux seront :

- de mieux connaître les besoins des donneurs d'ordre en matière d'auscultation et de suivi, en distinguant l'urbain de l'interurbain, et les niveaux de service visés (suivant l'importance de la voie) ;
- de réaliser également un retour d'expérience, sur l'auscultation de différents réseaux, ou différentes sections de chaussées, afin d'évaluer les possibilités et les limites des moyens d'auscultation existants, et d'orienter les travaux de recherche et d'optimisation de ces outils.

L'enquête auprès des maîtres d'ouvrage devra démarrer dès le début du projet, car elle conditionnera les travaux ultérieurs. La durée prévue est de 6 mois.

Pour cette action les partenaires identifiés à ce stade sont : Département de l'Eure (CD27), IFSTTAR, Cerema, Vectra, ainsi que probablement les conseils départementaux de l'Oise (CD60) et du Puy-de-Dôme (CD63).

#### 3.2.1.2 Programme de travail

Après l'enquête sur les besoins des maîtres d'ouvrage menée conjointement par le Cerema et l'IFSTTAR, l'objectif sera de sélectionner, avec les maîtres d'ouvrage participant au projet, plusieurs types de réseaux, sur lesquels des investigations détaillées seront réalisées, en couplant des auscultations en surface (en comparant éventuellement plusieurs méthodes) et l'observation des matériaux après carottage. Elles viseront à établir un diagnostic complet comprenant le relevé de dégradation, les caractéristiques structurelles et les caractéristiques de surface. A partir de ces données, l'objectif sera de :

- définir les programmes d'auscultation (type de mesures, fréquence, phasage..) les plus adaptés à différents types de réseaux, en intégrant les aspects coût et rentabilité des études menées ;
- constituer une base de données de mesures, qui servira de base pour la construction d'indicateurs structurels de l'état des réseaux, qui seront développés dans le sujet 2.3.

L'étude se fera sur plusieurs réseaux départementaux, en distinguant réseaux urbains et interurbains, et pour différentes catégories de voies, correspondant à des niveaux de service différents. Les investigations envisagées sont précisées ci-dessous :

#### Département de l'Eure (CD27)

La campagne d'auscultation porterait en priorité sur le réseau de deuxième catégorie qui est plus sensible (voies secondaires, constituées de chaussées souples), plus sensible, soit 2 904 km sur les 4 279 km gérés par le Département. L'objectif est de coupler auscultation de surface et observation des matériaux après carottage. On sélectionnera les sections où l'on dispose de données sur les structures, et les niveaux de trafic.

#### Phasage des auscultations

L'ensemble du réseau étudié (tout ou partie de la catégorie 2) sera d'abord ausculté à grand rendement, (externe) :



- Relevé visuel de dégradations (externe au CD27) ;
- Mesure de l'uni transversal (externe au CD27) ;
- Mesure de l'uni longitudinal bitrace dans et hors bande de roulement.

Seront déterminés ici : un indicateur structurel à partir des dégradations et déformations et un indicateur structurel défini à partir des mesures d'uni sera recherché et confronté au précédent.

Sur certains tronçons déterminés lors de la phase précédente, représentatifs des différents états, plusieurs techniques d'auscultation seront utilisées à des fins de comparaison et/ou d'un relevé plus complet.

L'objectif est ici de comparer les conclusions tirées d'un relevé à grand rendement, avec des investigations détaillées mais plus coûteuses.

Les essais à réaliser pourraient être :

- déflexions (externe au CD27) ;
- mesure en continu de l'épaisseur des couches par RADAR (externe au CD27) ;
- carottages (internes CD27) ;
- relevé visuel de dégradation (interne au CD27) à des fins de comparaison avec le relevé à grand rendement.

L'état de l'assainissement de la route sera également estimé sur ces sections (par expert), conformément à la méthode décrite dans le guide technique « Drainage routier » par exemple. Cet aspect est en effet encore plus essentiel sur des chaussées souples.

Cette partie se termine par la détermination des travaux nécessaires, et leur chiffrage approximatif, de façon à mettre en évidence la rentabilité des études. Pour cela les largeurs de chaussées seront nécessaires.

### Départements de l'Oise et du Puy-de-Dôme

Le CD63 dispose de plusieurs relevés dans le temps, présente une variété de climats et d'altitudes et pourrait utilement contribuer à cette étude, que ce soit pour les voies de catégorie 1 ou 2, en fournissant des données, en répondant à l'enquête et en fournissant leurs critères de choix de travaux. Le CD60 pourrait également contribuer de la même façon. Le retour d'expérience de ces départements dans deux autres contextes climatiques permettra d'affiner les observations de l'étude précédente.

Durée de cette action : 2 ans y compris les types de travaux

#### 3.2.1.3 Livrables

- Comparaison de plusieurs techniques d'auscultation et adéquation de chacune aux différents réseaux ;
- Établissement de programmes différenciés d'auscultation en fonction de la connaissance empirique du réseau ;
- Définition des auscultations nécessaires et optionnelles par type de réseau.

## 3.2.2 Thème 2.2 – Méthodes de mesure et d'auscultation *in situ*

### 3.2.2.1 Objectifs et partenaires

Ce deuxième sujet est plus « amont », et vise à travailler sur la mise au point et l'amélioration de différentes méthodes d'auscultation, qui apparaissent les plus pertinentes pour l'évaluation de l'état structurel des chaussées. Le travail proposé portera sur :

- l'amélioration des méthodes existantes les plus utilisées, que sont les relevés des dégradations de surface et les mesures de déflexion. L'évolution des méthodes de relevé de ces dégradations, et des outils de traitement des données nécessitent de revoir les méthodes de collecte et d'analyse des résultats de ces essais ;

- la mise au point et l'évaluation d'autres méthodes non destructives, pour la détection de défauts structurels, tels que des décollements, ou des fissures internes ;
- la recherche de solutions alternatives d'auscultation, adaptées notamment aux réseaux secondaires, par des méthodes basées sur l'utilisation de véhicules traceurs. Il s'agit d'évaluer l'état d'un réseau non plus en utilisant des véhicules d'auscultation dédiés, mais par l'utilisation de véhicules traceurs (flotte de véhicules d'une entreprise, d'un service technique de département, etc.), équipés de capteurs d'un coût relativement limité, qui, lors de leurs déplacements, fournissent des mesures sur l'état du réseau parcouru.

Partenaires : IFSTTAR, Vectra, COLAS, Université de Limoges / GEMH, Cerema, Eiffage Travaux Publics

### 3.2.2.2 Dégradations de chaussées

Les relevés de dégradations sont actuellement réalisés conformément à la méthode d'essais LPC n°38-2 « Relevés de dégradations de surface des chaussées ». Cette méthode rédigée en 1997 fait la distinction entre 7 modes opératoires fonction de l'objectif de l'étude : étude de renforcement, programmation de travaux, évaluation de réseau... Cette méthode doit aujourd'hui être actualisée au regard de l'évolution des moyens de relevés de dégradations (notamment les méthodes automatiques de relevé par capteurs laser) mais aussi des moyens de mesures des déformations transversales.

Cette actualisation s'attachera à définir des indicateurs plus en adéquation avec les modes d'endommagement des chaussées observés en France ces dernières années, à redéfinir les exigences en matière de répétabilité et reproductibilité des relevés et à simplifier les différents modes opératoires au regard des besoins des maîtres d'ouvrages, préalablement définis (cf. thème 2.1).

Par ailleurs, les méthodes plus performantes, automatiques, de relevé des dégradations permettent de réaliser des analyses plus fines de la fissuration (largeur des fissures, orientation, etc..) et de la texture des revêtements (arrachements notamment), permettant de mieux caractériser l'état de dégradation de la chaussée et ses défauts structurels. Dans ce contexte, l'IFSTTAR développe et teste depuis plusieurs années, en partenariat avec le Cerema, des méthodes automatiques de détection de la fissuration à partir d'images numériques. Ces méthodes seront utilisées, en liaison avec les outils de relevé de dégradation, pour le calcul d'une segmentation automatique des fissures et l'estimation de caractéristiques de la fissuration (épaisseur, orientation). A partir de ces mesures, des indicateurs de l'état de fissuration seront proposés, et comparés avec les indicateurs de dégradations de la méthode LPC n° 38-2. Une recherche d'indicateurs autres que les indicateurs traditionnels basés sur la fissuration sera également engagée.

Enfin, à partir des seuls relevés des dégradations de surface (selon notamment les classes de trafic supporté par les sections correspondantes), une étude de faisabilité sera conduite en vue de proposer une méthode de prédiction du potentiel structurel résiduel. Pour cela, un travail de comparaison sera mené entre les prédictions faites à partir des relevés réalisés et l'évolution réelle des sections auscultées.

#### Livrables

- Proposition de révision de la méthode LPC n°38-2 ;
- Benchmarking de méthode de détection automatique de fissures sur des images de luminance (2D) et des images 3D ;
- Développement d'une méthode de prédiction du potentiel structurel résiduel uniquement à partir de relevés des dégradations de surface.

### 3.2.2.3 Déflexion

L'objectif de ce second sujet est de travailler sur l'amélioration de l'analyse des bassins de déflexion complets, par différentes méthodes :

- mesures à grand rendement au moyen du déflectographe ou du curviamètre ;
- mesures locales au FWD.

#### Mesures au déflectographe et au curviamètre

Aujourd'hui, les mesures de déflexion à grand rendement sont réalisées en France avec le déflectographe ou le curviamètre. Ces équipements permettent de relever, tous les 5 mètres, le bassin de déflexion de la chaussée sous un essieu de 13 tonnes. Actuellement, l'exploitation de ces mesures se limite en général au calcul de la déflexion maximale, et éventuellement du rayon de courbure. Ces paramètres donnent une idée globale de la rigidité de la structure, mais ne permettent pas un calcul inverse précis des caractéristiques des différentes couches de chaussées, ni une évaluation de leur état d'endommagement.

L'objectif des travaux proposés sera d'améliorer l'interprétation des mesures fournies par ces appareils, en travaillant sur l'exploitation des bassins de déflexion complets, à l'échelle d'un itinéraire. Ces travaux seront réalisés en plusieurs étapes :

- ▶ on s'intéressera d'abord à la modélisation de la réponse des différents appareils de mesure de déflexion (Déflectographe Lacroix, FLASH, curviamètre...) dans différentes conditions de mesures. Ces études viseront notamment à modéliser l'influence de différents défauts (fissure, décollement), et aussi des différentes conditions expérimentales de mesure (températures en particulier) sur le bassin de déflexion. Ces études permettront de définir, à partir des bassins de déflexion, des indicateurs permettant d'identifier différents types de dégradation des chaussées (décollements d'interfaces, présence de fissures) ;
- ▶ le travail se poursuivra par le développement de méthodes de traitement statistique des bassins de déflexion, à l'échelle d'un itinéraire. Ces travaux viseront à classer l'ensemble des mesures de déflexion obtenues sur cet itinéraire en différentes catégories, afin d'aboutir à un découpage en zones structurellement homogènes de cet itinéraire ;
- ▶ enfin, on cherchera à optimiser les procédures de calcul inverse sur ces typologies de bassin de déflexion pour obtenir les caractéristiques mécaniques des couches, et identifier des défauts tels que des décollements.

Ces analyses permettront de réaliser ensuite des modélisations des différentes sections de chaussées, en vue de déterminer leur durée de vie résiduelle ou de définir des solutions de travaux à mettre en œuvre, en lien avec le thème 3 de DVDC.

Cette méthodologie d'analyse des bassins de déflexion complets sera ensuite appliquée à l'analyse de mesures de déflexions réalisées sur différents types de structures de chaussées, dont l'historique est bien connu, sélectionnées en collaboration avec différents maîtres d'ouvrage. Des essais de répétabilité pourront également être envisagés pour évaluer la dispersion des mesures et la compatibilité de cette dispersion avec une sensibilité au dommage structurel des couches.

En complément, l'IFSTTAR et le Cerema suivront les travaux en cours d'évaluation du TSD (Traffic Speed Deflectometer), qui permet de réaliser des mesures de déflexion à la vitesse du trafic, afin de préciser les performances et possibilités d'utilisation de cet appareil.

#### Mesures au FWD

Il existe une grande quantité de travaux (en France et à l'étranger) sur l'analyse inverse et la modélisation des mesures au FWD, pour le calcul des propriétés des couches de chaussées, ou l'établissement de différents

indicateurs de performance structurelle. Ces travaux apparaissent, en partie, transposables aux analyses envisagées des bassins de déflexion mesurés par le curviamètre et le déflectographe.

Le travail proposé est donc de faire une bibliographie détaillée sur ces méthodes de traitement des mesures au FWD, afin d'en dégager ce qui peut être appliqué aux mesures des appareils à grand rendement (curviamètre, déflectographe). Ce travail sera réalisé par l'université de Limoges – GEMH en lien avec le Cerema.

### Livrables

- Développement d'une méthodologie d'analyse par calcul inverse pour déterminer le potentiel structurel résiduel de la chaussée ;
- Définition des indicateurs (paramètres liés au bassin de déflexion) sensibles aux dégradations qui affectent la durabilité des chaussées ;
- Développement des algorithmes permettant d'aboutir au calcul de ces indicateurs de façon fiable ;
- Développement des procédures informatiques permettant le traitement statistique de l'ensemble des bassins de déflexion relevés lors de l'auscultation d'un itinéraire, afin de définir sur cet itinéraire des zones structurellement homogènes.

#### 3.2.2.4 Autres méthodes d'auscultation non destructives

Les travaux proposés viseront à travailler sur l'analyse de méthodes d'auscultation par propagation d'ondes mécaniques (ultrasons) ou électromagnétiques (RADAR). L'objectif est de proposer des méthodes d'analyse de signaux pour améliorer la détection et la localisation de défauts dans les structures de chaussées (décollements, fissuration..) et établir des indicateurs de caractérisation de ces défauts, pour le diagnostic structurel de la chaussée.

Les mesures pourront être réalisées sur le manège de fatigue (en faisant varier les conditions de mesure, température, humidité), et sur une ou plusieurs sections de chaussées étudiées dans le projet.

Les méthodes suivantes seront utilisées :

- UPE (ultrasons): l'IFSTTAR a acquis en 2007 un système de mesures par ultrasons, basé sur le principe de la propagation d'ondes mécaniques en cisaillement. Un module complémentaire utilisant cette fois des ondes de compression a été acquis en 2014. Le travail proposé consiste à exploiter conjointement les mesures de cisaillement et de compression de l'UPE pour améliorer la détection et la caractérisation des interfaces de chaussées, mais aussi la caractérisation du matériau (module, coefficient de Poisson) à la fréquence d'auscultation. Actuellement, le système de mesure est manuel, mais il pourrait être automatisé, si la mesure est pertinente.
- RADAR : La méthode RADAR est la méthode opérationnelle la plus utilisée pour la détection des interfaces. L'interprétation des données n'est cependant pas immédiate et nécessite un personnel qualifié. Des outils d'aide à l'interprétation sont nécessaires pour étendre son usage opérationnel. Une base de données couplant mesure RADAR et carottage sera constituée afin de travailler sur la définition d'un indicateur permettant de caractériser l'état des interfaces.

### Livrables

- Amélioration technique des outils de diagnostic en vue d'une meilleure caractérisation de l'état de dégradation des chaussées (recherche de défauts, décollement, fissuration à l'aide de méthode de propagation d'ondes mécaniques) ;
- Méthodes d'interprétation des signaux RADAR et UPE pour la détection de défauts et la caractérisation des matériaux de chaussées.

### 3.2.2.5 Auscultation par véhicules traceurs

L'objectif de ce dernier sujet est de travailler sur une méthode d'auscultation basée sur l'utilisation de véhicules traceurs (flotte de véhicules d'un gestionnaire, par exemple), équipés de capteurs, qui collectent des informations sur l'état du réseau. Ces données doivent être transmises à un serveur, puis agrégées dans une base de données, afin de restituer les informations au gestionnaire.

Des travaux préliminaires réalisés au sein de l'IFSTTAR ont permis de valider expérimentalement la faisabilité de cette méthode d'auscultation innovante pour la mesure de l'uni longitudinal des chaussées. Les mesures ont été réalisées en utilisant comme dispositif de mesure un smartphone, dont on utilise les capteurs (accéléromètre, GPS). Le système a été testé sur la base d'un nombre limité de véhicules traceurs et sur un itinéraire-test relativement court (env. 100 km). Dans le cadre du projet DVDC, on se propose de tendre vers des conditions opérationnelles par une application totalement automatisée à plus grande échelle (ex : réseau routier d'un département) et sur une période d'observation supérieure à 1 an. De cette façon, le niveau de service offert par la méthode d'auscultation pourra être déterminé précisément puis discuté avec les gestionnaires d'infrastructures (ex : pertinence des indicateurs existants, aide à l'exploitation, etc.).

Par ailleurs, en parallèle à l'auscultation de l'uni des chaussées (qui peut être réalisée au moyen de smartphones, ou d'un capteur à bas coût, installé sur le véhicule), d'autres fonctions d'auscultation au moyen de véhicules traceurs pourront être étudiées (géométrie des infrastructures, détection de nids-de-poule, etc.).

Le travail comprendra les étapes suivantes :

- instrumentation des véhicules traceurs : développement de systèmes de mesures à bas coût embarqués dans les véhicules (smartphones et/ou capteurs déportés) ;
- prétraitement des données collectées par chaque véhicule : filtrage des données, calcul d'indicateurs, etc.
- création d'une base de données rassemblant l'ensemble des informations délivrées par les véhicules traceurs. cette base permettra le stockage et l'organisation des informations (par date, par route, par véhicule traceur...);
- recalage spatial des trajectoires suivies par les véhicules traceurs sur un même référentiel géographique (map-matching) ;
- agrégation des informations apportées individuellement par les véhicules traceurs par méthodes de fusion ;
- restitution des indicateurs finaux (ex : projection sur des fonds de carte).

#### Livrables

- Développement d'un démonstrateur pour la mesure d'uni à l'échelle d'un réseau au moyen de véhicules traceurs ;
- Evaluation de la méthode sur un réseau de dimensions suffisantes (réseau départemental) ;
- Etude de faisabilité de l'ajout d'autres fonctionnalités de mesure au moyen des véhicules traceurs

## 3.2.3 Thème 2.3 – Indices structurels

### 3.2.3.1 Objectifs et partenaires

Pour permettre l'évaluation de l'état d'un réseau routier, il est nécessaire de travailler à l'échelle des indicateurs élémentaires, quantifiant un phénomène physique, ainsi que sur leur évolution en fonction de différentes variables explicatives (durée, trafic, cycles climatiques, etc.). Beaucoup de travaux ont été réalisés dans ce domaine.

Il reste toutefois à définir des indices structurels adaptés aux besoins des gestionnaires, leur permettant d'assurer une gestion optimisée de leur réseau routier, et sur l'évolution de ces indices.



Par ailleurs, si aujourd’hui différentes méthodes existent, notamment la méthodologie IQRN largement déployée sur le territoire, aucun indicateur « standard » permettant une comparaison de l’état de différents réseaux routiers n’a été défini.

Les partenaires pour ce sous-thème sont EGIS international, Cerema, Vectra et le CD71 (à solliciter).

### 3.2.3.2 Programme de travail

Un benchmarking des indices structurels sera réalisé conjointement par EGIS International et le Cerema. Ce travail impactant d’autres sous-thèmes (notamment le 2.2 « méthodes et mesures d’auscultation in situ ») devra intervenir dès le début du projet (durant les 6 premiers mois). Ce travail s’appuiera sur les résultats des projets internationaux tels que les actions COST, comités AIPCR, etc. ainsi que sur les retours d’expériences de la direction Chaussées et Patrimoine : intervention dans de nombreux projets sur différents types de réseaux (projets autoroutiers, concessions, projets sur routes départementales, routes non revêtues, réseau de routes nationales à l’échelle d’un pays).

A partir des méthodes d’auscultation en France ou à l’étranger, une définition d’indices adaptés aux différents réseaux sera recherchée (VECTRA, Cerema). Ces nouveaux indicateurs s’appuieront notamment sur les pratiques existantes, la révision des méthodes de relevés de dégradations (cf. thème 2.1), les résultats des enquêtes visant à définir les besoins des maîtres d’ouvrage (cf. thème 2.1).

Parallèlement, afin de permettre aux différents gestionnaires de comparer l’état de leur réseau routier, une définition d’indice « standards » sera recherchée (VECTRA, Cerema, IFSTTAR). Ces indices devront porter sur le niveau de service offert par l’infrastructure (« indice de surface ») mais aussi sur la valeur patrimoniale (« indice structurel »). L’objectif à atteindre est de définir des indicateurs simples d’utilisation (données d’entrée, mode de calcul, exploitation).

Un ou des indicateurs non différenciés par type de réseau ne posent pas de problème – les niveaux de service différents pouvant être a priori appréhendés par des seuils différents.

Le travail servira également de base de données aux études envisagées dans le sous-thème 3.2 (aspects probabilistes). Des échanges entre ces deux sous-thèmes seront organisés afin d’orienter au mieux la définition de nouveaux indicateurs.

### 3.2.3.3 Livrables

- Benchmarking des indices structurels utilisés en France et à l’étranger ;
- Définition d’indices structurels adaptés aux différents réseaux ;
- Définition d’indices « standards » utilisables par tous gestionnaires de réseaux.

## 3.3 THEME 3 – EVALUATION DE LA DUREE DE VIE RESIDUELLE

Le thème 3 du projet DVDC porte sur « l’évaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées », qui joue un rôle central dans les problématiques de gestion technico-économique des réseaux routiers.

Appliquée aux chaussées, la notion de « durée de vie résiduelle » est une grandeur permettant de rendre compte en continu de l’« état d’endommagement » au sens large d’un réseau routier (communal, départemental ou national) et constitue à ce titre une information importante du tableau de bord des maîtres d’ouvrage.

A condition de disposer de lois d’évolution prévisionnelles pertinentes, elle permet aussi d’anticiper sur le devenir de la valeur patrimoniale d’un réseau routier, en fonction de programmes de travaux d’entretien donnés. Elle est ainsi à l’origine du développement d’outils d’aide à la décision, permettant aux gestionnaires,

d'optimiser et planifier les campagnes d'entretien des réseaux routiers, en fonction de contraintes budgétaires données et du respect d'un état de service minimal des chaussées.

Le thème 3 du projet DVDC s'inscrit dans une démarche d'amélioration des méthodologies et des outils développés dans ce domaine en se basant à la fois sur des approches « locales » de modélisation mécanique et des approches plus globales de type statistique à l'échelle des réseaux.

Afin de contextualiser le programme de travail de ce thème 3 sur la durée de vie résiduelle des chaussées, rappelons quelques principes généraux des méthodologies déployées aujourd'hui et des difficultés qu'elles soulèvent.

La gestion technico-économiques des réseaux routiers fait intervenir deux échelles :

- l'échelle plurikilométrique des réseaux routiers eux-mêmes, souvent subdivisés en itinéraires de plus petites longueurs ;
- l'échelle décamétrique associée à la décomposition de ces linéaires, en tronçons « homogènes ».

Cette seconde permet le suivi analytique de l'état des chaussées. La première permet par agrégation des données et des indicateurs provenant des tronçons, de superviser l'état d'un réseau routier et sa gestion dans sa globalité. A l'échelle d'un tronçon ou d'une famille de tronçons homogènes, on peut alors distinguer deux opérations principales :

- l'une est la « mesure » directe et périodique de l'état de la chaussée, par auscultations *in situ* ;
- l'autre est la détermination des lois d'évolution des diverses familles de structure, tenant compte de l'effet des travaux d'entretien.

La première opération permet d'obtenir des photographies de l'état physique avéré des chaussées, directement utiles aux suivis et à la surveillance, assurés par les maîtres d'ouvrage et est indispensable en prévision de travaux. Mais elle fournit aussi au fur et à mesure du temps les « points de mesure » reliant l'état structurel des tronçons en fonction de leur âge et des travaux d'entretien réalisés, nécessaires en seconde opération, à la construction des lois d'évolution et à leur recalibrage périodique.

L'ensemble de la démarche fait donc ressortir les besoins suivants (B1, B2, B3), en partie couverts aujourd'hui mais perfectibles :

- B1) pouvoir disposer d'outils et méthodes d'auscultation permettant d'identifier les divers mécanismes d'endommagement à l'œuvre dans les chaussées et permettant de les quantifier à l'aide d'indicateurs ; autant que possible, ces outils doivent être non intrusifs, à grand rendement et doivent permettre d'alerter assez précocement de dommages en cours d'aggravation. Ces outils sont principalement développés dans le thème 2 de DVDC ;
- B2) pouvoir disposer de méthodes efficaces de construction et de calibrage des lois d'évolution, permettant si possible d'espacer la périodicité des campagnes d'auscultation et de prévoir au mieux, entre temps, l'état des chaussées et l'effet prévisionnel des opérations d'entretien ;
- B3) par ailleurs un effort particulier est à produire par rapport aux développements actuels, sur l'endommagement propre des couches de surface (y compris concernant leurs propriétés d'usage, mais hors du champ du présent projet), qui ont un rôle protecteur essentiel vis-à-vis du corps de chaussée et dont l'entretien représente une grande part des volumes et dépenses de travaux. Ces couches présentent également un certain nombre de modes d'endommagement spécifiques (forte sensibilité au climat, efforts tangentiels, etc.).

Les trois thèmes de DVDC participent dans leur ensemble à ces items.

Les thèmes 1 et 2 tournés respectivement vers l'étude des mécanismes d'endommagement et l'amélioration des méthodes et des outils d'auscultation visent notamment à élargir la détection et la connaissance des modes d'endommagement des chaussées à d'autres mécanismes, que ceux usuellement considérés au stade du dimensionnement, qui (de ce fait) ne s'avèrent pas toujours les causes prépondérantes de détérioration des chaussées. En particulier certains des mécanismes qu'il est prévu d'étudier dans le thème 1 (cf. décollements d'interface) sont susceptibles d'affecter le comportement des couches de surface (contribution à B3).

Quant au thème 3, il couvre lui aussi les trois problématiques B1, B2, B3 avec l'objectif principal de pouvoir définir et calculer des « indicateurs d'endommagement » des chaussées (corps de chaussée, couches de surface) et fournir leurs lois d'évolution, en vue de leur intégration dans les logiciels de gestion des réseaux routiers.



L'une des pistes générales envisagées à travers ce thème pour tendre vers les améliorations mentionnées en B2 est de tenter d'introduire « plus de mécanique » dans la formulation et la construction des lois d'évolution, essentiellement basées aujourd'hui sur une exploitation statistique des campagnes d'auscultation et assez peu sur l'emploi de variables et modèles explicatifs.

Ainsi vis-à-vis de l'item B1, l'un des objectifs du thème 3 sera de proposer des modèles permettant la construction d'indicateurs, représentatifs de l'état des chaussées, en tirant profit d'une part des relevés d'auscultation et d'autre part des connaissances acquises sur les mécanismes d'endommagement.

On cherchera par ailleurs à utiliser ces mêmes apports « mécaniques » vis-à-vis de l'item B2, de façon à faciliter la détermination de la forme des lois d'évolution et l'identification de leurs paramètres numériques. On s'interrogera en particulier à travers ce prisme sur la prise en compte de l'effet des travaux.

### 3.3.1 Modèles de dégradation des structures

#### 3.3.1.1 Développement d'un outil numérique pour le diagnostic des chaussées fissurées

Partenaire(s) : INSA Strasbourg / ICUBE (UMR 7357)

Le travail proposé vise à analyser les mesures des bassins de déflexion (cf. méthodes d'auscultation, thème 2.2), à la lumière de modélisations mécaniques numériques, de façon à caractériser l'état de fissuration des corps de chaussée.

La technique de calcul proposée est basée sur un couplage entre la mécanique de la rupture et l'utilisation de la méthode des éléments de frontière, qui se prête naturellement à une représentation surfacique des réseaux de fissures.

L'outil de calcul envisagé devrait non seulement constituer une aide au diagnostic, mais aussi une aide au dimensionnement du renforcement des structures fissurées.

Sans attendre l'aboutissement de ces outils, il est prévu d'amorcer ce travail et sur la base de techniques de calcul classiques. Une étude théorique de sensibilité des bassins de déflexion, vis-à-vis de quelques scénarios théoriques, simplifiés, de fissuration des chaussées sera menée. Ceci permettra de comparer les niveaux de perturbation attendue par rapport à la précision des techniques et outils d'auscultation usuels et d'estimer assez tôt dans le projet le potentiel de l'analyse inverse des bassins de déflexion pour la reconnaissance de l'état d'endommagement interne des chaussées.

#### Livrables

- Modélisation directe avec outils de calcul usuels de quelques scénarios types de fissuration ;
- Description théorique de l'outil de calcul couplant éléments de frontière + mécanique de la rupture ;
- Application de l'outil au calcul de chaussées fissurées ;
- Analyse inverse de bols de déflexion mesurés sur chaussée.

#### 3.3.1.2 Initiation et remontée de fissures sur supports endommagés

Partenaire(s) : IFSTTAR Nantes (LAMES)

Cette proposition vise à caractériser l'effet local de travaux de renforcement sur la durée de vie des chaussées. Comme dans le cas de la proposition précédente (les 2 propositions convergent assez largement sur ce point), la situation considérée sera celle du renforcement d'une chaussée fissurée par substitution d'une couche de base saine.

Une première étape consistera à déterminer dans les modèles un mode de représentation approprié d'une couche support (couche de fondation) fissurée.

L'étape suivante consistera à examiner l'initiation et la remontée de fissure dans une couche neuve posée sur support fissuré de façon à déterminer un temps de remontée de fissure et à comparer les résultats en relatif, par rapport au cas d'une remontée de fissure sur couche de fondation saine.

On pourra alors chercher à traduire la différence entre les 2 cas (caractérisée par exemple à travers le ratio des temps de remontée de fissure sur support sain et support initialement endommagé) dans les lois d'évolution, afin de préciser par approche « mécanique » l'effet de travaux d'entretien.

Les calculs seront menés en 3D (fissures surfaciques), en tenant compte autant que possible des spécificités « fortes » des chaussées : comportement thermo-visco-élastique des matériaux bitumineux, charges roulantes avec balayage, etc...

### Livrable

- Outil de calcul pour l'étude de l'initiation de fissure 3D sur chaussée renforcée – Description et applications

### 3.3.2 Aspects probabilistes

Les développements ci-dessous s'intéressent aux méthodes et aux modèles de prédiction, en se plaçant sur deux plans différents :

- d'une part on cherche par l'observation statistique à retrouver une loi d'évolution du réseau dans son ensemble afin d'optimiser la gestion du réseau ;
- d'autre part, dans un souci de prédiction et de dimensionnement, on cherche à expliquer les indices de dégradation de chaussées.

#### 3.3.2.1 Méthode et modèle de prédiction

Partenaire(s) : Université de Limoges (GEMH)

Sur un réseau, les indices de performances des différents tronçons de chaussée ne varient pas indépendamment les uns des autres. Il existe :

- des évolutions dans le temps dépendant de variables intrinsèques aux chaussées (liants, dimensions des couches, qualités de finition, ...) et de variables extérieures (climat, trafic,...) ;
- des corrélations spatiales dépendant de ces mêmes variables.

Les lois de dégradations ont été bien étudiées (cf. Lepert et Coll, programme HDM5) ; elles dépendent de variables explicatives qui sont quasi-constantes pour chaque tronçon du réseau. De même, si les paramètres géostatistiques des distributions stochastiques spatiales sont à identifier, ils dépendent des mêmes variables explicatives et restent aussi quasi-constants au cours du temps. La proposition s'articule autour de ces deux remarques et se décline en trois volets.

On analysera dans un premier volet les distributions stochastiques spatiales des différents indices. En particulier une analyse des paramètres géostatistiques les caractérisant sera effectuée.

Dans un second temps, la méthode d'actualisation dynamique des lois de dégradation par tronçon s'appuyant sur les inspections passées et sur les corrélations spatiales sera élaborée.

Le troisième volet porte sur la mise au point de la méthode de choix du tronçon à inspecter, du type d'inspection (quel indice de performance, quel instrument de mesure) et de l'intervalle d'inspection. L'objectif ici est d'optimiser la politique d'inspection en fonction de critères choisis par le donneur d'ordre.



Ces trois volets seront caractérisés par la prise en compte du caractère aléatoire et spatialement corrélé des paramètres intrinsèques, d'une part, et des incertitudes liées aux modèles mécaniques et aux lois d'évolution, ainsi qu'aux techniques d'inspection, d'autre part. La méthodologie proposée s'appuiera en grande partie sur un couplage entre les approches statistiques et les modèles mécaniques et physiques des phénomènes mis en jeu.

### Livrable

- Programme d'inspection d'un réseau avec :
- en entrée les données d'inspection par tronçon mis à jour à chaque inspection, et les critères d'optimisation d'inspection choisis ;
- en sortie, les tronçons à inspecter, les dates d'inspection, le type d'inspection (pour quel indice) et l'identification des tronçons critiques par indice avec leur date de criticité

#### 3.3.2.2 Modélisation statistique des dégradations de chaussées avec prise en compte de l'entretien

Partenaire(s) : IFSTTAR (EASE, LAMES)

L'action de recherche s'appuie sur l'expérience de l'IFSTTAR en matière de développement d'outils de gestion des réseaux routiers, notamment à l'aide de modèles statistiques prenant en compte d'une part l'effet de variables explicatives (paramètres intrinsèques aux chaussées, conditions climatiques, trafic...), d'autre part la corrélation existant entre relevés successifs (dans le temps) effectués sur un même tronçon de chaussée. Une partie de ces actions est valorisée aujourd'hui dans le logiciel de gestion et d'aide à la programmation des travaux, GiRR.

La recherche comporte quatre volets.

On effectuera dans un premier temps une étude bibliographique des modèles d'évolution des chaussées avec un focus particulier sur les méthodes développées à l'IFSTTAR, qui ont été validées par des études de bases de données réelles.

Sur la base d'exemples de pathologies bien déterminées (ex : fissuration remontante, décollement de couches,...) pour lesquelles on dispose de modèles mécaniques explicatifs, semi-quantitatifs, il sera examiné dans un deuxième temps la possibilité d'intégrer une composante mécanique aux approches statistiques. Les bénéfices attendus d'une telle démarche sont d'une part l'amélioration de l'adéquation des modèles statistiques aux données, une diminution d'autre part des sources d'incertitude introduites dans ces modèles. Le troisième volet de la proposition s'inscrit dans cette même démarche, mais en étant tourné vers la prise en compte de l'effet des travaux d'entretien (de type réhabilitation), qui ne peuvent être généralement considérés comme une totale remise à neuf des structures, ni une remise à « zéro » des modèles (hypothèse souvent retenue aujourd'hui). D'où découle une autre source importante d'incertitudes des modèles probabilistes. C'est pourquoi il sera également examiné la possibilité de combler une partie de celles-ci à partir de l'apport de modèles mécaniques simulant l'effet des travaux. L'étude pourra s'appuyer notamment sur les modélisations mécaniques prévues dans le thème 3.1 visant à rendre compte de l'initiation de remontée de fissures dans une couche neuve construite sur une ancienne couche endommagée. On pourra chercher également à appuyer sur des études comparatives d'évolution d'état des chaussées avant et après entretien, sur données réelles.

Le quatrième volet porte sur la représentation dynamique et l'analyse cartographique de l'évolution de l'état des réseaux routiers. Il s'agit de compléter les outils d'aide à la gestion par une méthodologie et un outil cartographique permettant de représenter non seulement l'état des réseaux routiers, mais aussi leurs évolutions dans le temps, prévues par les modèles. On visera en particulier à représenter les corrélations entre sections de chaussées, afin d'aider à l'optimisation et à la programmation des chantiers d'intervention.

Comme déjà mentionné, une grande part des travaux prévus dans le cadre de cette action devront s'appuyer sur des données réelles, issues de campagnes de suivi des réseaux routiers. Des partenariats avec des gestionnaires routiers seront à créer à cet effet dans le cadre du projet DVDC.

**Livrables**

- Etude bibliographique des modèles probabilistes d'évolution des chaussées ;
- Méthodologie pour la modélisation statistique des dégradations de chaussées avec prise en compte des modèles mécaniques de comportement des matériaux ;
- Idem précédent avec prise en compte de l'effet de l'entretien ;
- Méthodologie globale pour la modélisation statistique des dégradations de chaussées, avec prise en compte et représentation des caractéristiques spatiales.

**3.3.2.3 Spécificités des chaussées béton**

Les partenaires identifiés sur ce projet sont : le SPECBEA, Route et Conseil, Cimbéton

Le premier travail de ce groupe consistera à recueillir les données issues de chantiers européens (Belgique et Allemagne essentiellement) et internationaux (Etats-Unis et Canada principalement). Cette étude recensera les différentes techniques utilisées (dalles, présence d'armatures, type de fondation, etc.), les durées de vie initiale envisagées, les entretiens ultérieurs, et l'évolution des dégradations constatées jusqu'à la ruine des structures. Ce travail s'appuiera également sur les recherches entreprises dans le cadre des propositions d'action du thème 1 sur les mécanismes de dégradation des chaussées.

La seconde action visera à proposer des méthodes de détermination de la durée de vie résiduelle des chaussées en béton de ciment et graves sous la forme d'abaques ou autres schémas. Une démarche d'analyse statistique de ces retours d'expérience sera utilisée. Cette démarche s'attachera à préciser les points suivants :

- i. évaluation statistique des durées de vie résiduelles pour chaque technique d'entretien ;
- ii. définition de la notion de capital restant (ou de de dommage subi) ; il s'agira ici de définir la notion de « variable de dommage » pour les chaussées béton et de son évaluation numérique. Le choix de cette variable de dommage sera défini en coordination avec les autres sous-groupes travaillant sur ce sujet (Université de Limoges, IFSTTAR, Cerema).

Enfin, ce programme d'étude proposera des synoptiques d'évolution des structures en fonction du temps suivant l'origine des dégradations constatées (défauts de conception, de réalisation et/ou dégradation lors de l'utilisation de la structure), la nature des sollicitations supportées par la chaussée (intensité et/ou type de trafic, climat), les entretiens apportés couplés au vieillissement des matériaux.

**Livrables**

- Recueil de données sur les modes de dégradations des chaussées en béton de ciment et graves traitées aux liants hydrauliques en Europe et à l'International ;
- Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées en béton de ciment et semi-rigides suivant le niveau de trafic, les techniques d'entretien utilisées et l'évolution des matériaux dans le temps. Cette évaluation de la durée de vie pourra se présenter sous la forme d'abaques ou de schémas.

**3.3.3 Cas des couches de surface**

Ce volet de l'étude sur la durée de vie des chaussées a pour objectif une meilleure connaissance des principaux mécanismes de dégradations des couches de surface ainsi que l'établissement de méthodologies d'aide à la conception et à l'évaluation de la durée de vie des couche de roulement. Ce volet, qui fait référence aux besoins identifiés de l'item B3, recouvre par ailleurs les items B1 et B2 dans le cas spécifique des couches de roulement et de leurs modes de dégradations propres.

Ces mécanismes sont en effet absents aujourd'hui des méthodes de dimensionnement classiques. La dégradation des couches de surface est un phénomène complexe couplant de l'endommagement mécanique du au trafic à une lente détérioration physico-chimique des liants et des granulats (action de l'eau, du gel, des ultra-violets, des sels de déverglaçage, des carburants, etc.). Nous distinguerons donc deux aspects pour la suite de l'étude sur les couches de surface : une approche mécanistique sur l'amélioration de la compréhension des



sollicitations mécaniques subies par les couches de roulement (cisaillement, fissuration par le haut, rotation des contraintes principales) (à rapprocher des préoccupations du point B1) et une approche probabiliste de la durabilité des revêtements fondée sur un large retour d'expérience (à rapprocher des préoccupations du point B2). Il est à noter que les caractéristiques de surface liées à l'adhérence (évolution des paramètres de micro-texture et de macro-texture notamment) sont hors champ du projet DVDC.

### 3.3.3.1 Approche numérique de la modélisation des états de contraintes dans les couches de surface (et interfaces)

Les partenaires identifiés sur cette étude sont : l'université de Limoges et l'INSA de Lyon (Laboratoire LaMCoS). Afin de mieux appréhender les mécanismes de dégradation des couches de surface, ce projet propose d'affiner les connaissances ainsi que les modèles mécanistiques existants sur le contact pneumatique-chaussée. Deux avancées restent à faire dans ce domaine : la modélisation plus fine de ces contacts et la prise en compte de la rotation des contraintes principales dans le comportement des enrobés bitumineux. Ces mécanismes sont impliqués dans les dégradations de surface des enrobés tels l'orniérage ou les fissurations descendantes (top-down cracking).

Les récents développements dans le domaine de l'approche calculatoire semi-analytique réalisés par l'université de Limoges et l'INSA de Lyon (logiciel SAM) permettent aujourd'hui de disposer d'un outil efficace, plus réaliste dans la modélisation et surtout plus rapide que les moyens actuels de calcul (de types éléments finis). Un comparatif avec les données expérimentales disponibles (mesures expérimentales réalisées par De BEER et l'IFSTTAR) permettra de valider la pertinence de ce modèle initialement développé pour le calcul des roulements à billes.

Les résultats à venir issus de ces outils pourront être intégrés à la démarche de dimensionnement et ainsi contribuer à une évaluation plus fine de la durée de vie des couches de surface. Les contraintes tangentielles bien approximées issues de la modélisation induisent des déformations par extension critiques plus réalistes à proximité immédiate du pneumatique. Ainsi celles-ci devenues critiques permettent d'accéder directement à l'évaluation de l'endommagement « top-down » due à l'extension critique induite. Aussi les lois de fatigue traditionnelles ne sont peut-être plus aussi adaptées et il conviendra alors d'associer à ces pathologies de dégradation de surface sous sollicitation tangentielles des essais spécifiques en cisaillement.

S'agissant des interfaces, les modèles issus de la tribologie (SAM) montrent que l'intensité maximale des sollicitations de cisaillement se situe quelques centimètres sous la surface de chaussée à savoir à proximité ou au niveau de l'interface de la couche de surface. On peut alors imaginer une dégradation de la couche de surface induite par une dégradation des propriétés de l'interface par cisaillement. Le modèle proposé permet de modéliser les sollicitations de cisaillement à l'interface et d'en déduire la durée de vie avec des résultats de fatigue d'interface par cisaillement alterné. Par ailleurs cette dégradation progressive élève le niveau des sollicitations dans la couche de surface pouvant accroître l'orniérage ou la fatigue de la couche de surface.

Cette étude sur la modélisation des sollicitations mécaniques engendrées par le contact pneumatique-chaussée dans les couches de surface comprendra également une analyse de la rotation des axes principaux de contraintes, rotation induites par le déplacement des chargements. Il s'agit d'un mécanisme en lien avec les dégradations d'orniérage et de fissuration par le haut non pris en compte aujourd'hui dans le comportement cyclique des matériaux. Les essais envisagés pourront être des essais axiaux-torsion cycliques qui permettent la rotation des contraintes principales sous sollicitations cycliques en laboratoire. Les deux phénomènes de dégradations peuvent être observés et alimenter les paramètres de modèles d'endommagement ou d'orniérage par accumulation des déformations permanentes notamment induites par la rotation des contraintes principales non considérée jusqu'à présent dans les essais de laboratoire. Ces essais pourront être menés parallèlement au thème 1 du projet DVDC.

#### Livrables

- Modélisation des sollicitations de cisaillement aux interfaces et déduction de la durée de vie avec des résultats de fatigue d'interface par cisaillement alterné ;

- Evaluation de l'endommagement « top-down ».

### 3.3.3.2 Approche méthodologique sur la durabilité des couches de surface : retours d'expérience et analyses statistiques

Les partenaires identifiés sur ce projet sont : l'entreprise COLAS, le Cerema (DTEREst, DTERMed) et l'IFSTTAR (laboratoire LAMES).

La première action de ce programme concerne l'étude de la durabilité des couches de surfaces en fonction du niveau de trafic et vis-à-vis de l'état des couches supports, dans le cas d'opérations de rechargement ou de réfection de voiries.

Cette étude sur la durabilité des techniques de couches de surface s'inscrit pleinement dans les problématiques actuelles des gestionnaires de réseau en proposant à terme des outils de calcul d'un amortissement technique des dépenses d'entretien des réseaux routiers.

Pour ce faire, une enquête de grande ampleur auprès des maîtres d'ouvrages partenaires du projet (Conseils Départementaux, Directions Interdépartementales des Routes) sera lancée afin d'établir un panel de sites représentatifs des différentes techniques d'entretien des couches de surfaces. Ce panel regroupera par technique, différents niveaux de trafic (et donc de niveau de service), ainsi que différents types de supports avec des états structurel ou de surface variables.

Cette étude prévoit donc, par site retenu, des auscultations complètes (état visuel des défauts) en amont et après application incluant : un relevé des dégradations le plus exhaustif possible (orniérage, fissurations, plumage, ressuage, flash, etc.). Les enquêtes et auscultations de terrain porteront également sur l'état et la nature des supports avant application. Une approche probabiliste sur l'ensemble de ces données proposera des abaques permettant un choix raisonné des techniques d'entretien. Des liens avec les propositions identifiées relatives à l'item B1 (en particulier les propositions 1 et 2) seront à envisager en fonction de la nature des supports et des retours statistiques qui en découleront.

La seconde action de ce programme sur les couches de surface se focalisera sur les aspects de vieillissement et de mécanismes de dégradations des enrobés (vieillissement des bitumes en particulier).

Cette étude vise à évaluer les mécanismes prépondérants de dégradations des couches de surface. Cette démarche s'appuiera notamment sur les travaux menés ces dernières années par le Cerema/DTERMed (Laboratoire d'Aix en Provence).

Des enquêtes auprès des gestionnaires de réseau (à l'image des travaux du projet GEPUR) sont envisagées. Un recensement de chantiers « types » au niveau national est prévu en lien avec des dégradations caractéristiques des enrobés. Ce travail s'accompagnera de campagnes d'auscultation afin d'évaluer les spécificités de ces pathologies et les niveaux de gravité associés. Enfin, des modes d'évolutions de ces dégradations dans le temps dues à l'action combinée des différents mécanismes conduisant à la ruine d'un revêtement pourront être proposés.

#### Livrables

- Abaques d'évaluation de la durée de vie des différentes techniques en couches de surface suivant le niveau de trafic cumulé et l'état des supports ;
- Retours d'expériences sur le vieillissement des couches de surfaces. Contribution à l'amélioration du choix des techniques en lien avec les attentes des maîtres d'ouvrages et des gestionnaires et à l'amélioration de l'évaluation de la durabilité des techniques.

## 4 VALORISATION

---

### 4.1 STRATEGIE DE VALORISATION

La valorisation du projet sera traitée dans le cadre d'un groupe de travail dédié (groupe de travail n°4 – GT4). Cependant, une stratégie de valorisation a d'ores-et-déjà été définie pour valoriser les travaux menés.

Les conclusions et résultats seront présentés sous la forme de :

- guides techniques,
- proposition d'évolution de méthodes et/ou normes,
- notes techniques / recommandations,
- articles scientifiques et/ou technique

L'IDRRIM<sup>14</sup> sera associé à l'édition et à la diffusion des livrables principaux du projet.

Le site internet français/anglais servira de support principal pour la communication du projet et comportera en particulier les éléments suivants :

- les partenaires du projet,
- les grandes lignes du programme de recherche,
- les actualités du projet,
- les documents et résultats du projet destinés à être diffusés largement.

Les informations du site internet seront relayées par des moyens de communication de type :

- newsletters
- flux RSS
- etc.

Un accès réservé aux acteurs du projet sera mis en place pour les échanges de données, les calendriers de réunion, la liste de tâches, les utilisateurs, les contacts, les listes de diffusion (*mailing lists*), les e-mails de groupe, etc.

Pendant la phase d'avancement du projet, des journées d'information seront organisées pour les partenaires.

Une conférence ouverte à toute la profession, pour faire le point sur le déroulement des recherches et informer l'ensemble des professions partenaires des premiers résultats obtenus, sera organisée à mi-parcours.

La fin du projet sera marquée par des actions de valorisation et de diffusion des résultats :

- ▶ la rédaction des livrables principaux, y compris avec la constitution d'un comité de relecture, puis la diffusion en association avec l'IDRRIM ;
- ▶ la publication des résultats qui auront été considérés comme publics par le comité décisionnel du projet ;
- ▶ des présentations publiques des résultats.

#### **Séminaire « Caractérisation des interfaces par essais destructifs »**

Dans les quatre premiers mois suivant le démarrage du projet, l'USIRF organisera un séminaire sur la caractérisation des interfaces par essais destructifs, associant l'ensemble des partenaires du projet.

Ce séminaire permettra de communiquer les résultats et le détail des études déjà réalisées avec l'ENSAM et l'IRC-ESTP sur l'évaluation des méthodes d'essais concernant les liaisons inter-couches. Il permettra également de repenser l'analyse du collage des couches de chaussées à travers de l'observation rationnelle des mécanismes physiques à l'œuvre dans les chaussées. Le séminaire pourrait permettre de faire émerger une

---

<sup>14</sup> Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité ([www.idrrim.com](http://www.idrrim.com))



proposition d'essais en laboratoire et *in situ* apte à prédire la pérennité ou non du collage de deux couches entre elles, selon leur usage.

## 4.2 GUIDES PRATIQUES

Le thème 4 a pour objectif principal d'aboutir à des guides et méthodes opérationnels pour la communauté routière, en s'appuyant sur les résultats des thèmes 1 à 3. Il s'agit donc d'un thème transversal qui sera organisé en quatre ateliers :

- propositions d'évolution de la méthode de dimensionnement des chaussées neuves ;
- conception des couches de surface ;
- méthode d'évaluation de la durée de vie résiduelle des couches de chaussée ;
- aménagement des méthodes d'entretien.

Les méthodes développées répondront à des enjeux économiques clairement établis au cours du projet. La valeur patrimoniale des différents réseaux s'élève à plus de 2 000 Mds € (source IDRRIM). Ce patrimoine, compte tenu de son importance stratégique et de son rôle dans l'économie du pays, doit être entretenu et modernisé en fixant un niveau de service qui est fonction du type d'itinéraire et de sa hiérarchie. Aujourd'hui, les informations disponibles sont parcellaires et manquent d'homogénéité. En ce qui concerne le réseau national, le rapport du Conseil Général des Ponts et Chaussées : « Audit sur l'estimation du patrimoine routier national non concédé »<sup>15</sup> donne une valeur globale de 106 Mds € pour les 13 724 km du réseau routier national ainsi qu'un coût d'entretien. Le volet entretien actualise la valeur moyenne pour améliorer le réseau d'un point d'IQRN (Image Qualité du Réseau Routier National) en fonction des données disponibles.

Ce type de démarche peut être étendu aux différents réseaux : réseau autoroutier concédé, routes départementales, voirie urbaine... Les résultats de cette étude doivent permettre de fixer les enjeux économiques et de programmer l'entretien routier avec son impact économique :

- ▶ quels moyens faut-il consacrer annuellement à l'entretien routier ?
- ▶ quel est l'impact d'1 € investi sur le niveau de service offert à l'utilisateur et quel est le gain pour l'utilisateur ?

L'étude comprendra deux volets :

- ▶ un volet économique qui s'appuie sur les données existantes chez les différents maîtres d'ouvrage et concessionnaires en s'appuyant sur des études de cas,
- ▶ un volet à dire d'experts qui chiffre le coût de l'entretien en fonction des techniques disponibles et des solutions d'entretien adaptées aux différents types de réseau. Le chiffrage sera fait en fonction des données économiques actuelles.

Les livrables principaux du projet seront les résultats des ateliers du thème 4 :

- ✓ Etats de l'art : dimensionnement, retours d'expérience et auscultation des réseaux (LP0)
- ✓ Propositions d'évolution de la méthode de dimensionnement des chaussées neuves (LP1)
- ✓ Aménagement des méthodes d'entretien (LP2)
- ✓ Guide technique « conception et dimensionnement des couches de surface » (LP3)
- ✓ Méthode d'évaluation de la durée de vie résiduelle des couches de chaussée (LP4)

<sup>15</sup> Audit sur l'estimation du patrimoine routier national non concédé, DETERNE Jean, DIQUET Jean-Claude, Conseil général des ponts et chaussées, mars 2007

## 5 ASPECTS ORGANISATIONNELS ET BUDGETAIRES

### 5.1 LES PARTENAIRES INTERESSES

Les organismes concernés par ce projet sont les entreprises de construction et d'entretien routier, les sociétés concessionnaires d'autoroutes, les maîtres d'ouvrage, les maîtres d'œuvre, les bureaux d'études / ingénieries, les établissements publics de recherche, les laboratoires privés de la construction, les Grandes Écoles et Universités, Ministères, les industriels producteurs de matériaux de construction, etc.

<p><b>Maîtres d'ouvrages et gestionnaires :</b>                  MEDDE/DIT                  Conseils départementaux                  Communautés d'agglomérations                  Métropoles                  ADSTD                  AITF</p>	<p><b>Ingénieries</b>                  Cerema                  SYNTEC-ingénierie                  CINOV                  Vectra                  Ingerop                  Erasmus                  Egis                  Rincen BTP                  Groupe CEBTP</p>
<p><b>Entreprises</b>                  Eiffage Travaux Publics                  Eurovia                  Colas                  Malet                  Charier TP                  Roger Martin                  Le Foll TP                  USIRF                  FNTP                  Groupe NGE</p>	<p><b>Sociétés concessionnaires d'autoroutes</b>                  ASFA                  ASF                  Cofiroute                  AREA                  APRR                  SANEF</p>
<p><b>Industriels</b>                  Total                  Adfors                  GPB                  Lhoist                  SP Reinforcement</p>	<p><b>Partenaires académiques</b>                  IFSTTAR                  ENTPE                  ESTP                  INSA Strasbourg                  ENSAM                  Université de Limoges                  Université Bordeaux 1</p>

### 5.2 ORGANISATION

Le pilotage et la coordination du projet seront similaires à ceux de projets nationaux récents, avec la mise en place :

- d'un **Comité de Direction (CODIR)**, avec un Président à sa tête, qui comprend un représentant de chaque partenaire,
- d'un **Comité de Pilotage (COPI)** pour le suivi plus opérationnel, auquel participent le président, les directeurs scientifiques et techniques et les co-animateurs des thèmes de recherche ;
- de groupes de travail pour chaque thème du projet, animés par un binôme.

Les rôles et règles de fonctionnement de ces comités sont explicités dans la charte provisoire du projet, cf. annexe 0. Figurent également dans la charte les règles relatives à la propriété industrielle, à l'exploitation des résultats et à la confidentialité.

La partie administrative et financière du projet sera gérée par l'IREX.

### 5.2.1 Comité de direction

Le Comité de direction détient la totalité des pouvoirs de décision concernant le déroulement du projet. Il :

- définit les orientations stratégiques du projet,
- arrête les programmes et les budgets annuels,
- suit l'exécution des études et des travaux,
- décide au besoin les modifications ou extensions à apporter au programme de recherche et décide éventuellement de l'opportunité de présenter une demande de subvention complémentaire pour une partie du programme de recherche,
- approuve les rapports définitifs et les recommandations qui constituent l'un des objectifs essentiels du projet,
- définit les modalités de validation des livrables des actions de recherche.

### 5.2.2 Comité de pilotage

Le comité de pilotage est composé, en plus de la direction du projet, des co-animateurs des groupes thématiques :

Thème	Animateurs
Thème 1 – Mécanismes de dégradation	Anne DONY (ESTP) Pierre HORNYCH (IFSTTAR)
Thème 2 – Caractérisation de l'état d'un réseau	Luc-Amaury GEORGE (Vectra) Sébastien WASNER (Cerema/DTerMed)
Thème 3 – Evaluation de la durée de vie résiduelle d'une chaussée	Alan EZAOUI (Eurovia) Jean-Michel PIAU (IFSTTAR)

Le comité de pilotage coordonne le projet et veille à la cohérence des travaux. Il a pour missions entre autres de :

- définir avec précision les actions de recherche à entreprendre dans le cadre du Projet, qui sont ensuite approuvées par le Comité de direction ;
- organiser, avec les pilotes des groupes thématiques, la réalisation des actions de recherche ;
- assurer une coordination et la circulation de l'information entre les différents thèmes de recherche

En complément, des co-animateurs du thème 4 « valorisation » seront désignés en début de projet.

### 5.2.3 Groupes de travail

Les groupes de travail thématiques ont pour mission d'organiser, planifier, conduire et contrôler les travaux de recherche des thèmes définis dans le programme de recherche du projet. Peut assister aux actions et réunions d'un groupe thématique tout collaborateur d'un partenaire du projet.

Chaque groupe thématique est animé par un ou deux animateur(s) de thème, membre(s) du comité de pilotage. Les animateurs de thème sont responsables de la production des livrables de leur thème et représentants de leur groupe thématique au sein du comité de pilotage.

### 5.2.4 Comité international

Compte-tenu de l'enjeu international d'un tel projet dont l'objectif et les résultats attendus dépassent le cadre français, il sera créé un **comité International** auquel participeraient par exemple, cette liste étant à confirmer / compléter :

- ▶ TU Braunschweig : Michael Wistuba;
- ▶ ETS Montreal (Univ. du Quebec) : Alan Carter;
- ▶ EMPA Zurich : Manfred Partl;
- ▶ Belgian Road Research Centre: Ann Vanelstraete.

## 5.3 BUDGET PREVISIONNEL ET PLAN DE FINANCEMENT

### 5.3.1 Budget prévisionnel

Le tableau ci-dessous rapporte le chiffrage des différents thèmes de DVDC, selon les principes suivants :

- le budget global est le coût total de la recherche ;
- la « part PN » représente la subvention qui sera accordée au(x) partenaire(s) réalisant l'(les) action(s) de recherche ;
- la différence entre les deux est l'apport en nature. Il s'agit de contributions valorisées et liées à des actions de recherche du projet, prises en charge directement par les partenaires qui exécutent ces actions, et réalisées explicitement pour le programme de recherche, et non facturées au projet.

Le budget du projet ANR sur la fatigue et le vieillissement des matériaux bitumineux (sous-thème 1.4), en cours de montage, n'est pas intégré au budget du projet national présenté ci-dessous. Il sera probablement de l'ordre de 800 000 à 1 000 000 d'euros. Dans l'éventualité où le projet déposé à l'ANR ne serait pas retenu, un nouveau travail de priorisation serait à effectuer sur ce sous-thème afin de le rendre compatible avec les sources de financement du PN.

Actions / Description des actions de recherche	Budget global en € HT	Part PN en € HT
<b>THEME 1 - MECANISMES DE DEGRADATION</b>		
1.1 Retour d'expérience sur les mécanismes de dégradation	150 000	50 000
1.2 Sols supports et chaussées souples	238 900	77 000
1.3 Comportement des interfaces	387 500	112 000
1.4 Fatigue et vieillissement des matériaux	<i>Projet ANR</i>	<i>N/A</i>
1.5 Dégradations hivernales	318 500	80 000
<b>TOTAL (1)</b>	<b>1 094 900</b>	<b>319 000</b>
<b>THEME 2 - CARACTERISATION DE L'ETAT D'UN RESEAU</b>		
2.1 Retour d'expérience sur la connaissance de l'état du réseau	200 000	60 000
2.2 Méthodes de mesure et d'auscultation in situ	650 000	180 000
2.3 Indices structurels	150 000	45 000
<b>TOTAL (2)</b>	<b>1 000 000</b>	<b>285 000</b>
<b>THEME 3 - EVALUATION DE LA DUREE DE VIE RESIDUELLE D'UNE CHAUSSEE</b>		
3.1 Modèles de dégradation des structures	337 000	90 000
3.2 Aspects probabilistes	349 400	72 000
3.3 Cas des couches de surfaces	450 700	123 500
<b>TOTAL (3)</b>	<b>1 137 100</b>	<b>285 500</b>
<b>THEME 4 - VALORISATION</b>		
4.1 Site internet, communication, plateforme collaborative	15 000	-
4.2 Guides techniques	100 000	10 000
4.3 Séminaires, Journées d'information, restitution	50 000	15 000
<b>TOTAL (4)</b>	<b>165 000</b>	<b>25 000</b>
<b>TOTAL HT (€)</b>	<b>3 397 000</b>	<b>914 500</b>
Frais de gestion administratifs et financiers (5%)	169 850	169 850
<b>TOTAL HT (€)</b>	<b>3 566 850</b>	<b>1 084 350</b>

### 5.3.2 Plan de financement

Le projet a été construit sur l'hypothèse d'un taux de financement directeur de 30%. Ce taux correspond au ratio moyen entre la partie financée par le projet aux partenaires (part PN) et le coût total du projet (budget global). Les apports en nature représentent avec cette hypothèse 70% des coûts totaux du projet.

Selon ce principe, et dans un contexte où la part de financement des projets nationaux par le MEDDE est en forte baisse et non déterminée au moment de la rédaction de l'étude de montage, le plan prévisionnel de financement suivant a été imaginé :

- Etat (ministères / agences) ~ 5 à 10%
- Cotisations des partenaires ~ 20 à 25%
- apports exceptionnels ~ 0 à 5%

- Apports en nature ~ 70%

Un engagement de principe sera demandé aux partenaires potentiels en septembre 2015 afin de consolider les hypothèses relatives à la partie liée aux cotisations. L'engagement sera établi sur la base de la grille de cotisation – provisoire à ce stade – disponible dans la charte jointe en annexe. L'objectif est donc de recueillir 40 à 50 T où T est le taux de cotisation de base fixé à ce stade à 5 000 € HT / an sur 4 ans.

La DGITM a participé au financement de la présente étude. Elle sera de nouveau sollicitée pour cofinancer ce projet dans la mesure du possible.

## 5.4 PLANNING PREVISIONNEL

Actions / Description des actions de recherche	Année 1		Année 2		Année 3		Année 4	
<b>THEME 1 - MECANISMES DE DEGRADATION</b>								
1.1 Retour d'expérience sur les mécanismes de dégradation	■	■						
1.2 Sols supports et chaussées souples	■	■	■	■	■	■	■	
1.3 Comportement des interfaces	■	■	■	■	■	■	■	
1.4 Fatigue et vieillissement des matériaux			■	■	■	■	■	■
1.5 Dégradations hivernales		■	■	■	■	■	■	
	■	■	■	■	■	■	■	■
<b>THEME 2 - CARACTERISATION DE L'ETAT D'UN RESEAU</b>								
2.1 Retour d'expérience sur la connaissance de l'état du réseau	■	■	■	■				
2.2 Méthodes de mesure et d'auscultation in situ	■	■	■	■	■	■	■	
2.3 Indices structurels	■			■	■	■	■	
	■	■	■	■	■	■	■	■
<b>THEME 3 - EVALUATION DE LA DUREE DE VIE RESIDUELLE D'UNE CHAUSSEE</b>								
3.1 Modèles de dégradation des structures	■	■	■	■	■	■	■	■
3.2 Aspects probabilistes	■	■	■	■	■	■	■	■
3.3 Cas des couches de surfaces	■	■	■	■	■	■	■	■
	■	■	■	■	■	■	■	■
<b>THEME 4 - VALORISATION</b>								
4.1 Site internet, communication, plateforme collaborative	■	■	■	■	■	■	■	■
4.2 Guides techniques, rédaction des livrables principaux						■	■	■
4.3 Séminaires, Journées d'information, restitution	■				■			■

## 6 ANNEXES

### 6.1 ANNEXE 1 – REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LA PARTIE INTERNATIONALE

1. Dumont A-G : « analyse des chaussées à longue durée de vie dans le monde », EPFL-Lavoc, journées techniques 2007
2. FEHRL : <http://www.fehrl.org/index.php?m=155&mode=more&id=211>
3. OCDE : « Des chaussées à longue durée de vie pour routes à fortes circulation », 2008.
4. B. Mahut « Le projet européen NR2C New Road Construction Concept », Congrès Interoute, Rennes, 2006
5. NR2C : <http://nr2c.fehrl.org/>
6. N. Hautière, Ch. de la Roche R5G La route de 5<sup>ème</sup> génération, Présentation FNTP, juin 2013  
[http://www.fntp.fr/upload/docs/application/pdf/2013-06/r5g - sprir\\_idf\\_2013-06-25\\_16-10-59\\_31.pdf](http://www.fntp.fr/upload/docs/application/pdf/2013-06/r5g - sprir_idf_2013-06-25_16-10-59_31.pdf)
7. SilVia : [http://www.transport-research.info/web/projects/project\\_details.cfm?id=13742](http://www.transport-research.info/web/projects/project_details.cfm?id=13742)
8. CLEAN : <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-08-VILL-0010>
9. S. Bressi « Paramètres de performance dans les méthodes de dimensionnement », EPFL-Lavoc, journées techniques, 2012
10. Design Manual for Roads and Bridges – Highways Agency, Volume 7, Section 2, Part 3 – HD 26/06, February 2006
11. Department for Transport : <http://www.standardsforhighways.co.uk/dmrb/>
12. « 6.1 IC Secciones de firme, de la instrucción de carreteras » de 12 décembre 2003
13. A. Destree, DJ. De Visser, P-P Brichant, A. Vanelstraete : « importance des couches de collage et de l'adhésion inter-couches pour la durabilité des voiries », Congrès belge de la route, Liège 2013.
14. C. Raab, MN Partl « interlayer shear performance: experience with different pavement structures », 3<sup>rd</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienne 2004
15. FGSV : « Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht », 2009
16. FGSV : Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, ZTV Asphalt-StB 07 - Ausgabe 2007
17. FGSV : « Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt StB) Teil 80 Abscherversuch », 2012
18. National seminar on "Moisture sensitivity of asphalt pavements", San Diego, Californie, 4-6 février 2003.
19. « Comment éviter les dégradations hivernales des réseaux routiers? » Interoute 2010, Lyon
20. S. Lamothe « endommagement d'un enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure soumis à des sollicitations cycliques de gel-dégel et mécaniques », thèse de doctorat, ENTPE & ETS (Montréal), 17 juillet 2014
21. I. Drouadaine and all « Développement d'un essai de tenue à l'eau résiduelle des enrobés », RGRA n° 905, octobre 2012.
22. Vansteenkiste, S and all « Validation of the indirect tensile strength ratio (ITSR) as a performance indicator for water sensitivity of asphalt pavements » Proceedings of the 4th Eurasphalt & Eurobitume congress, May 2008, Copenhagen
23. FHWA : <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltpa/reports/03031/>
24. « Reflective Cracking in Pavements » conferences, Liège, 1989 – 1997.
25. G. Laurent « Les systèmes limitant la remontée des fissures de retrait hydraulique – point de vue l'observatoire des techniques de chaussées, Rgra n°752 , juin 1997
26. Workshop on the Curviameter: Interpretation and Exploitation of Measurements. 28 & 29 January 2015, CRR Belgique
27. CRR « Code de bonne pratique pour le choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l'entretien des chaussées »,
28. Cost action 354 : « The way forward for pavement performance indicators across Europe », final report, juillet 2008
29. Cost action 336 : "Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation", 1996
30. PARIS Project "Performance analysis of road infrastructure", Published by the EU, 1999 ISBN 92-828-7827
31. "Le projet européen SUDOE TRACC", Congrès de l'Idrriim, 2012
32. Y. Ennesser « Egis et l'adaptation au changement climatique », SECIF, 10 janvier 2012
33. IFSTTAR « S'adapter aux effets du changement climatique », revue Trajectoire n°9, avril 2015.
34. B. Diening, J-P Marchand « Retour d'expérience allemande des chaussées en béton », RGRA n° 853, nov. 2006
35. Duc-Tung Dao « (Multi-)recyclage du béton hydraulique », thèse de Doctorat soutenue le 29 mars 2012, à l'Ecole Centrale de Nantes

36. Recybéton, Revue « [Recyclage et Valorisation](#) », n°48 de mars 2015
37. OCDE : « Évaluation économique des chaussées à longue durée de vie »– phase 1, 2005, ITRD E123022
38. Les publications de l’AIPCR : « Prendre en compte les effets du changement climatique sur les chaussées routières », Comité technique D.2 Chaussées routières / Technical Committee D.2 Road Pavements, 2012, Référence AIPCR 2012R06FR, ISBN 2-84060-248-2

## 6.2 ANNEXE 2 – ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE PHENOMENE D'AUTOREPARATION

## 6.3 ANNEXE 3 – CHARTE PROVISOIRE DU PROJET NATIONAL DVDC