

Guide technique

Les renforcements de chaussées

Diagnostic et conception

Vignette 1**Vignette 2****Vignette 3****Photo de fond**

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

ministère de l'Écologie
du Développement
et de l'Aménagement
durables

Page laissée blanche intentionnellement

Guide technique

Les renforcement de chaussées

Diagnostic

Edité par le Sétra, réalisé par le Comité français pour les techniques routières (CFTR)

Le CFTR est une structure fédérative qui réunit les différentes composantes de la communauté routière française afin d'élaborer une expression de l'état de l'art partagée par tous et servant de référence aux professionnels routiers dans les domaines des chaussées, des terrassements et de l'assainissement routier.

Actions principales du CFTR :

- établissement de documents exprimant l'état de l'art,
- élaboration d'avis techniques sur l'aptitude à l'emploi de procédés, produits et matériels ainsi que de documents de qualification pour les matériels,
- délivrance d'agrément pour les laboratoires routiers,
- mise en œuvre de procédures de certification et de conformité aux normes



Comité français pour les techniques routières
10 rue Washington 75008 Paris
téléphone : 33 (0)1 44 13 32 84 - télécopie : 33 (0)1 42 25 89 99
mél : cftr@usirf.com
internet : <http://www.cftr.asso.fr>

Ce guide technique sur le diagnostic et la conception des renforcements de chaussées a été réalisé par un groupe de travail constitué de représentants du Réseau Scientifique et Technique et de l'Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française

Ce guide a été rédigé sous la coordination de Rolf Kobisch par :

Pascal Bauer, Emmanuel Delaval, Grégoire Durand, Lionel Grin, Anthony Guenanen, Yann Lefeuvre, Yves Meunier, Hugues Odéon, Stéphanie Périgois.

Les auteurs remercient : Michel Dautzats, Ollivier Hameury, Jacques Maribas, Jean Paul Michaut, Jean François Griselin, Alain Destombes, Michel Paillard de leurs participation actives

Sommaire

Avant-propos	8
Chapitre 1 : Fondement de la méthode	11
1 Principaux modes de fonctionnement et de dégradations des chaussées	12
2 Facteurs influant sur les dégradations.....	17
Chapitre 2 : Recueil des données d'auscultation	21
1 - Principes de l'auscultation des chaussées	22
2 - Phase 1 - Recueil des informations globales ou à caractère continu	22
3 Phase 2 - Découpage de l'itinéraire en zones homogènes – Implantation de zones témoins	40
4 Phase 3 - Investigations complémentaires sur les sections témoins	45
5 Synthèse des différentes données	48
Chapitre 3 : Diagnostic et modélisation	53
1 Principes généraux de la modélisation au service du diagnostic	54
2 Analyse calculatoire.....	54
3 Les chaussées souples traditionnelles.....	58
4 Les chaussées bitumineuses épaisses	74
5 Les chaussées à structure inverse.....	90
6 Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.....	102
7 Les chaussées mixtes	126
8 Orniérage des couches bitumineuses.....	135
9 Dégradations des couches de surface de type arrachement.....	138
10 Défauts de conception et de réalisation les plus fréquents.....	139
Chapitre 4 : Conception des solutions de travaux de renforcement	148
1 Objectif des travaux	149
2 Cahier des charges défini par le gestionnaire	149
3 Méthode de calcul des renforcements	150
4 Renforcement des chaussées souples et des chaussées bitumineuses épaisses	162
5 Renforcement des chaussées à structures inverses	167
6 Renforcement des structures à assise traitée aux liants hydrauliques (LG PB)	169
7 Renforcement des structures mixtes (LG PB)	173
8 Vérification au gel - dégel des renforcements (HO).....	174
9 Avantages et inconvénients des différentes solutions	179
Chapitre 5 – Dispositions constructives	193
1 Drainage	193
2 CARREFOURS GIRATOIRES	197
3 ELARGISSEMENTS	199
4 Mise en œuvre, uni, épaisseurs	199
ANNEXES	205
1 Annexe 1 – Application du Rayon de courbure aux chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	206

2	Annexe 2 – Sondages	209
3	Annexe 3 – Carottages.....	213
4	Annexe 4 - Caractéristiques mécaniques des matériaux de référence...	222
	Bibliographie.....	228

Avant-propos

Domaine d'application de la méthode

Ce guide de diagnostic et de conception des renforcements de chaussées s'applique à l'ensemble des types de structures routières à l'exception des structures de chaussées béton dont le cas est traité dans le Guide Technique Entretien des chaussées en béton. La classification sommaire des structures concernées par ce document est la suivante :

- Les chaussées souples traditionnelles, dont l'épaisseur est comprise entre 20 et 60 cm, qui sont composées de matériaux granulaires non liés, soit ancien (« hérisson » ou « macadam »), soit contemporains (graves ou concassés 0/D) et sont revêtues soit d'un enduit superficiel, soit de couches d'enrobés d'épaisseur inférieure à 12 cm.
- Les chaussées bitumineuses épaisses, constituées par au moins 12 cm d'enrobés et qui ne comportent pas de couches traitées aux liants hydrauliques.
- Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques composées :
 - des chaussées neuves à assise traitée aux liants hydrauliques minces sur fondation en GNT (épaisseur de MTLH inférieure ou égale à 25 cm) et les chaussées souples renforcées par des MTLH ;
 - des chaussées neuves à assise traitée aux liants hydrauliques épaisses avec fondation en MTLH (épaisseur de MTLH de plus de 25 cm) ;
 - des chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques ayant reçu un renforcement en GH.
- Les chaussées mixtes constituées :
 - des structures neuves mixtes (épaisseur de matériaux bitumineux supérieure ou égale à l'épaisseur de MTLH) ;
 - des structures à assise traitée aux liants hydrauliques devenues mixtes après entretien lorsque l'épaisseur de matériaux bitumineux est supérieure à celle des matériaux traités aux liants hydrauliques.
- Les chaussées à « Structure inverse » avec fondation en MTLH, couche de base en matériaux bitumineux entre lesquelles est intercalée une couche mince de Grave Non Traitée.

Définition des objectifs du gestionnaire

Pour assurer l'adéquation entre le programme d'étude et les objectifs du gestionnaire, il est nécessaire de s'informer auprès de celui-ci des hypothèses suivantes :

- la vocation particulière de la voie (activités industrielles, commerciales ou touristiques, ...) ;
- la durée de service des futurs travaux ou les scénarii de la politique d'entretien ;
- les particularités du trafic (trafic poids lourds actuel et prévisions de croissance futures, trafic particulier, ...) ;
- l'indice de gel de référence ;
- les exigences en matière de qualité d'usage (adhérence, uni, bruit, possibilité d'envisager des restrictions de tonnage en périodes hivernales ou la pose de barrières de dégel, la gêne à l'usager ou aux riverains engendrée par des travaux d'entretien, ...).

Fondement de la méthode

La méthode s'appuie sur :

- une connaissance et une bonne définition des objectifs du gestionnaire,
- la connaissance du fonctionnement et de l'évolution des types de structures dans leur environnement,
- une évaluation de la qualité résiduelle des structures,
- une caractérisation des matériaux utilisables pour le renforcement ou l'entretien des structures (caractéristiques mécaniques, règles et conditions d'emploi, ...),
- des règles de conception et dimensionnement des solutions de renforcement ou d'entretien.

Organisation générale du document

Le document est organisé en cinq chapitres et x annexes.

Chapitre 1 : Fondement de la méthode

Le chapitre 1 rappelle, pour les familles de structure réalisées en France (à l'exception des chaussées rigides), leur mode de fonctionnement et d'endommagement.

Concernant leurs évolutions, sont détaillés les facteurs les plus influant comme le trafic, les conditions climatiques, les matériaux (aléas à la fabrication et à la mise en œuvre), les interfaces entre couches, les conceptions géométriques des structures.

Chapitre 2 : Recueil des données d'auscultation

Le chapitre 2 décrit le principe de l'auscultation. Dans un premier temps l'itinéraire étudié fait l'objet d'une auscultation en continu qui permet dans un second temps un découpage en zones homogènes sur lesquelles sont implantées des sections témoins. Ces sections doivent conduire à identifier clairement les pathologies de l'itinéraire.

Chapitre 3 : Diagnostic et modélisation

Le chapitre 3 expose la démarche de modélisation structurelle des zones homogènes. Celle ci doit permettre de comprendre l'évolution de la chaussée étudiée et d'en établir la qualité résiduelle.

Chapitre 4 : Conception des solutions de travaux de renforcement

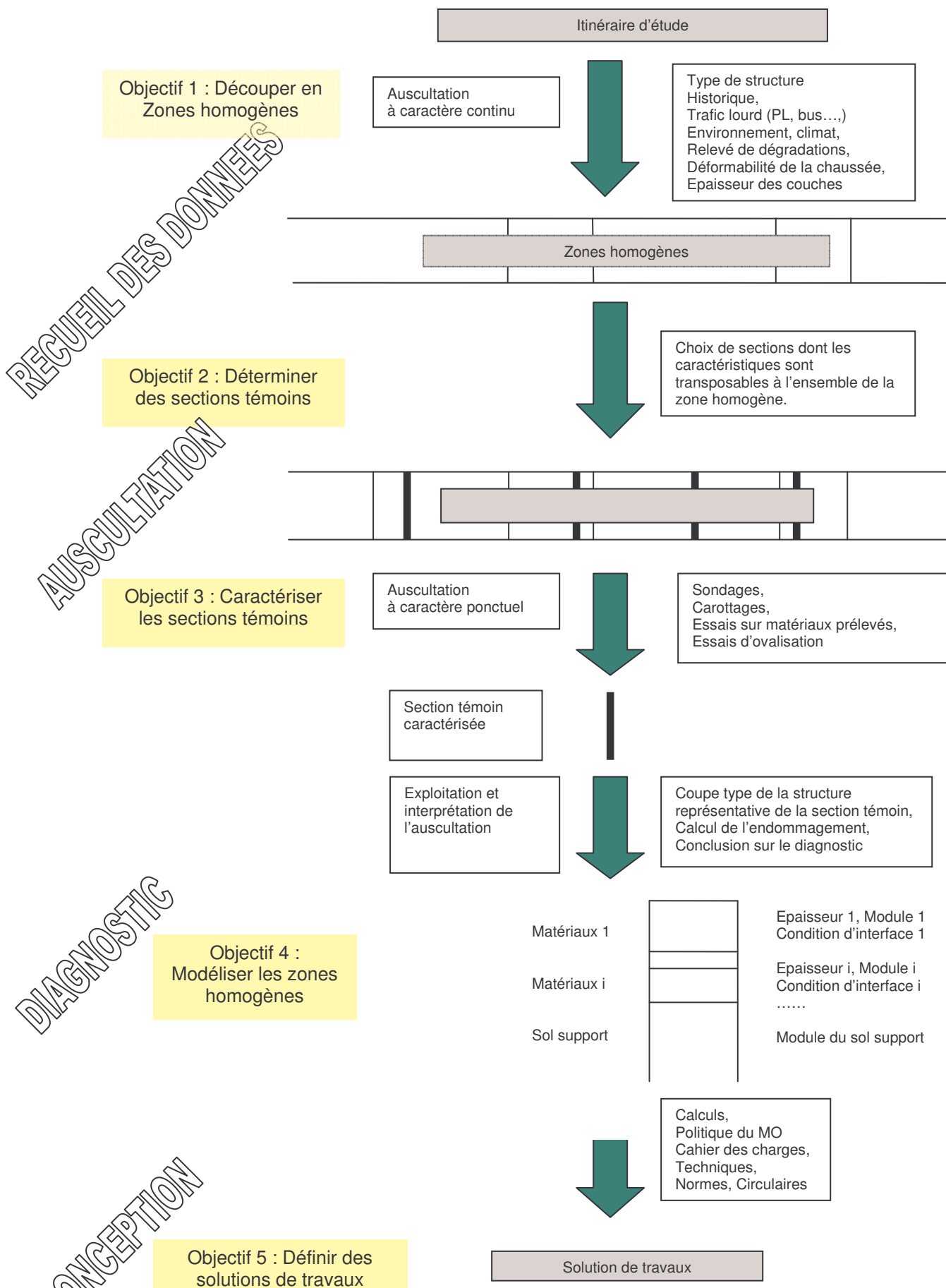
Le chapitre 4 présente la méthode d'élaboration des solutions de travaux fondées sur la modélisation de la structure existante, le cahier des charges du Maître d'Ouvrage et les conditions d'emploi des différentes techniques d'entretien et de renforcement.

Chapitre 5 : Dispositions constructives

Le chapitre 5 présente les conditions spécifiques pour la bonne réalisation des travaux d'entretien et de renforcement. Rappelons que la qualité des travaux est aussi sinon plus importante que leur définition.

Annexes

Synoptique de la démarche de renforcement de chaussées



Chapitre 1 : Fondement de la méthode

1 Principaux modes de fonctionnement et de dégradations des chaussées¹

Nota : Les modes de fonctionnement et de dégradations décrits ci-après sont ceux de chaussées construites suivant les règles de l'art (sans défauts notoires à la construction).

L'expression sol support utilisée ci-après désigne la ou les couches sur lesquelles reposent les assises de chaussée. Il peut s'agir du sol naturel ou de la plate-forme.

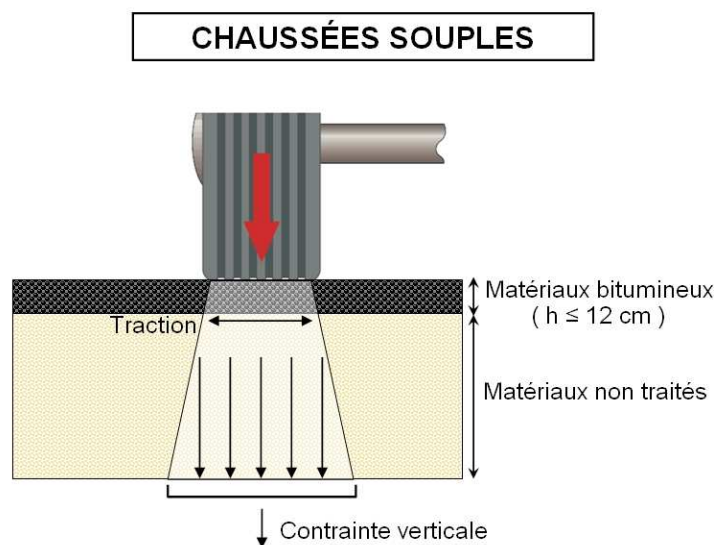
1.1 Les chaussées souples

Chaussées dont l'assise est constituée de matériaux non traités, recouverte par une épaisseur bitumineuse relativement faible (inférieure ou égale à 12 cm).

1.1.1 Mode de fonctionnement

L'assise en matériaux non traités présente une faible rigidité qui est en relation avec l'épaisseur de la couche granulaire et la rigidité du sol ; cela a pour effet de rendre ces chaussées particulièrement sensibles aux variations d'état hydrique des matériaux non traités et des sols supports.

La couverture bitumineuse relativement mince (≤ 12 cm) assure peu la diffusion des contraintes verticales dues au trafic et subit à sa base des efforts répétés de traction par flexion.



1.1.2 Mode d'endommagement

Les efforts verticaux transmis aux matériaux non traités et au sol support sont relativement élevés ce qui a pour effet d'entraîner l'apparition de déformations permanentes en surface (orniérage à grand rayon, flaches et affaissements) ; ces déformations croissent avec le cumul du trafic. Les efforts répétés de traction - flexion à la base de la couverture bitumineuse entraînent une fatigue de celle-ci, qui se traduit en surface par l'apparition de fissuration longitudinale évoluant rapidement vers un faïençage à mailles fines.

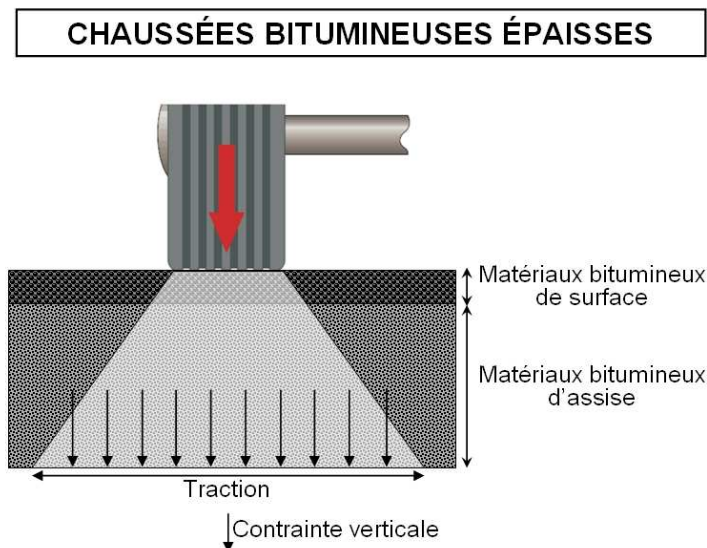
La possibilité pour les eaux superficielles de s'infiltrer dans l'assise provoque une accélération des dégradations : épaufures aux lèvres des fissures avec départ de matériaux, augmentation de l'amplitude des déformations, puis apparition de nids-de-poule.

¹ Guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussée » SETRA – LCPC 1994

1.2 Les chaussées bitumineuses épaisses

Chaussées dont l'assise est constituée en matériaux bitumineux, et dont l'épaisseur totale de matériaux bitumineux est supérieure à 12 cm.

1.2.1 Mode de fonctionnement



La rigidité des couches en matériaux bitumineux permet de diffuser, en les atténuant fortement, les contraintes verticales transmises au support. Les efforts induits par les charges roulantes sont repris en traction-flexion dans les couches bitumineuses.

Tant que les interfaces entre les différentes couches restent collées, les efforts de traction maximaux se produisent à la base de la couche la plus profonde. Si les couches sont décollées, chacune d'elles se trouve sollicitée en traction et peut se rompre par fatigue. La qualité des interfaces a donc une grande incidence sur le comportement de ces chaussées.

1.2.2 Mode d'endommagement

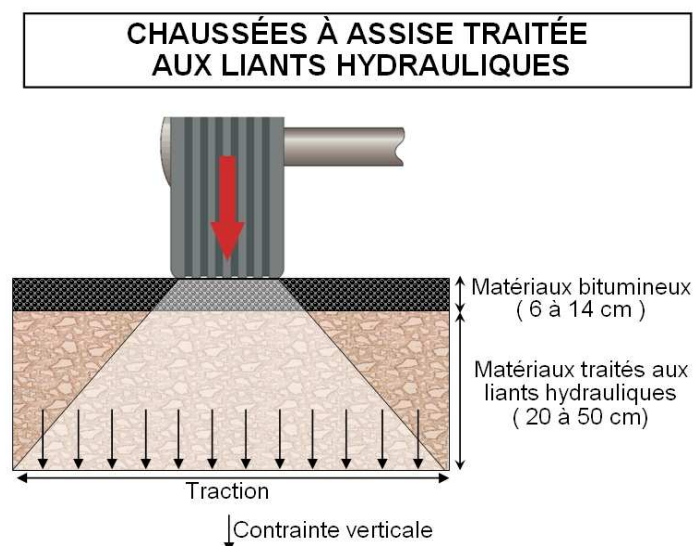
Dans le cas d'une chaussée correctement dimensionnée vis-à-vis du trafic et de la plate-forme support, les premières dégradations affectent généralement les couches de surface :

- orniérage par fluage de la couche de surface, favorisé par des températures élevées, un trafic lourd lent ou des choix inadaptés de matériaux et de formulation ;
- arrachement de gravillons sous l'effet des efforts tangentiels engendrés par le trafic ;
- apparition d'une fissuration anarchique traduisant un durcissement par vieillissement du bitume de la couche de roulement (oxydation, gradients thermiques, lessivage des eaux superficielles) ;
- les efforts verticaux transmis au support sont généralement suffisamment faibles pour ne pas entraîner de sollicitations excessives du sol à l'origine de déformations permanentes avant l'endommagement par fatigue des couches bitumineuses liées (sauf cas exceptionnels tels qu'une circulation intense après un hiver très rigoureux ou un défaut d'exécution par exemple) ;
- à plus long terme, les efforts répétés de traction-flexion à la base de l'assise bitumineuse entraînent une dégradation par fatigue de celle-ci, se traduisant par l'apparition d'une fissuration remontant peu à peu du fond de la structure jusqu'à affecter la couche de roulement. La fissuration longitudinale observée dès lors en surface évolue vers du faïençage dont la dimension des mailles se réduit peu à peu, cette transformation s'amorçant dans les zones plus faibles (qualité de portance du support, caractéristiques du matériau lié, zone de décollement entre couches) ;
- de la fissuration longitudinale dans les bandes de roulement peuvent aussi apparaître en progressant du haut vers le bas des couches bitumineuses.

1.3 Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Chaussées dont l'assise est constituée de matériaux traités avec un liant hydraulique.

1.3.1 Mode de fonctionnement



La grande rigidité des matériaux traités aux liants hydrauliques permet d'atténuer fortement les contraintes verticales transmises au support de chaussée.

L'assise traitée subit des contraintes de traction-flexion qui s'avèrent déterminantes pour le dimensionnement de ce type de chaussée.

Tant que l'interface entre la couche de base et la couche de fondation est collée, la contrainte maximale de traction est observée à la base de la couche de fondation. Si cette interface est décollée ou glissante, les couches travaillent toutes deux en traction à leur base. La qualité des interfaces a donc une grande incidence sur le comportement de ces chaussées.

Les assises traitées aux liants hydrauliques sont sujettes aux retraits de prise et thermique qui provoquent une fissuration transversale remontant rapidement au travers de la couche de roulement (de l'ordre du centimètre par an), selon un espacement assez régulier (entre 5 et 15 m).

Suivant les variations thermiques, l'ouverture de la fissuration évolue de quelques dixièmes de mm à quelques mm entraînant des conditions d'engrènement variables.

1.3.2 Mode d'endommagement

Au droit des fissures transversales de retrait :

- souvent franche lors de son apparition, la fissuration transversale tend à se dédoubler et à se ramifier sous l'effet du trafic. L'étanchéité de surface n'étant plus assurée, la pénétration des eaux superficielles lors de précipitations entraîne une dégradation de la structure. Sous l'effet du trafic lourd, l'eau présente dans la fissure transversale fait l'objet d'un pompage (surpression – dépression) ayant pour conséquences :
 - une diminution de la qualité du collage des interfaces et une désagrégation de la partie supérieure de l'assise et des parois de la fissure ;
 - une augmentation de l'allongement à la base de la couverture bitumineuse ;
 - un accroissement des contraintes de traction à la base des couches traitées et indirectement de la contrainte verticale sur le support de chaussée.
- en l'absence d'entretien (scellement des fissures de retrait), la dégradation de la fissuration transversale peut se traduire par l'apparition de remontées de boues en surface en période humide, la formation de flaches associées à du faïençage et des départs de matériaux (nids de poule).

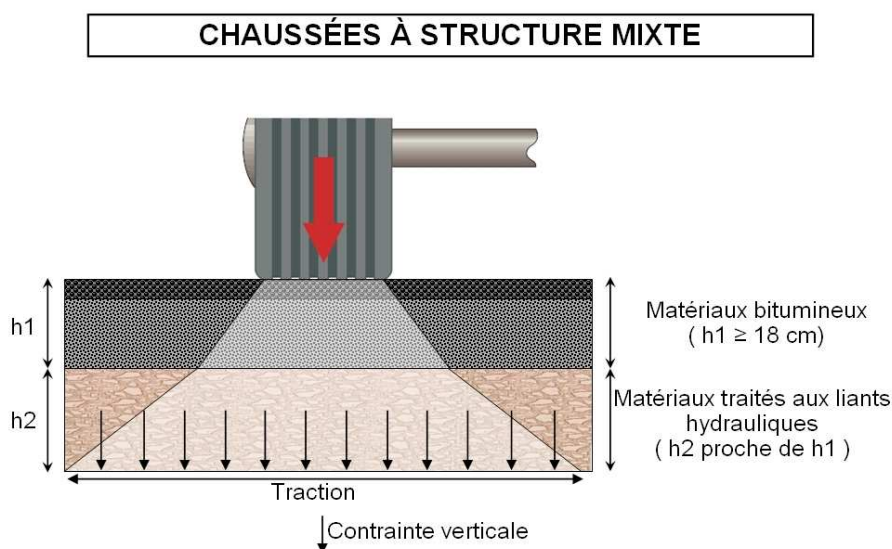
Sur l'ensemble de la chaussée :

- par suite de coefficients de dilatation thermique différents entre les matériaux bitumineux et hydrauliques et des contraintes tangentielles induites par l'action du trafic, l'interface entre matériaux bitumineux et matériaux hydrauliques peut être amenée à se décoller. Les quelques centimètres supérieurs de l'assise traitée étant souvent de plus faible résistance, un glissement partiel peut rapidement apparaître, ce qui a alors pour conséquence une dégradation rapide de la couche bitumineuse, par fatigue structurelle ;
- les efforts répétés de traction à la base de l'assise hydraulique entraînent sa dégradation par fatigue, traduite par une fissuration longitudinale qui se développe dans les bandes de roulement, et conduit à terme à la ruine de la structure en se maillant avec les fissures de retrait.

1.4 Les chaussées à structure mixte

Chaussées dont l'assise est constituée de deux couches de matériaux différents : fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques et base en matériaux bitumineux ; le rapport entre les épaisseurs bitumineuses totales et la couche de fondation doit être voisin de 1.

1.4.1 Mode de fonctionnement



Les matériaux hydrauliques de la couche de fondation diffusent et atténuent, du fait de leur rigidité élevée, les efforts transmis au sol support.

Grâce à son épaisseur, la couche de base en matériaux bitumineux permet de ralentir la remontée des fissures transversales de la couche de fondation et d'atténuer les gradients thermiques journaliers ; en sus, ses performances mécaniques lui permettent de réduire les contraintes de flexion à la base de la couche de fondation.

Par suite de coefficients de dilatation thermique différents entre les matériaux bitumineux et hydrauliques et de l'action du trafic, les couches de base et de fondation peuvent finir par se décoller et se rompre dans certaines zones, ce qui conduit à considérer un mode de fonctionnement mécanique de la structure en deux temps :

- 1^{er} temps : l'interface entre les couches de fondation et de base est considérée collée : la base de la couche traitée aux liants hydrauliques est sollicitée en fatigue par traction ;
- 2nd temps : l'interface entre les couches de fondation et de base est localement décollée : dès lors, les deux couches sont fortement sollicitées en traction à leur base.

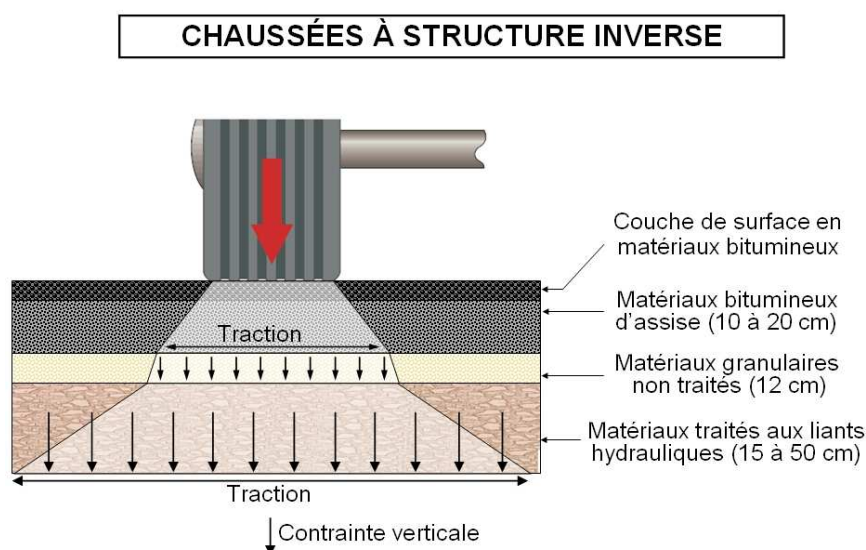
1.4.2 Mode d'endommagement

La fissuration transversale de retrait de la couche de fondation affecte au fil du temps les couches bitumineuses. Ces fissures par l'effet du trafic et des pénétrations d'eau évoluent en se dédoublant, entraînant une dégradation des matériaux bitumineux.

Les efforts répétés de traction à la base de l'assise hydraulique entraînent sa dégradation par fatigue traduite par l'apparition d'une fissuration longitudinale remontant peu à peu dans la structure. Lorsque la grave hydraulique est dégradée et/ou que l'interface entre les matériaux hydrauliques et bitumineux présente des signes de faiblesse, la couche de base est sollicitée à son tour par fatigue, ce qui se traduit alors par l'apparition d'une fissuration longitudinale.

1.5 Les structures inverses

Chaussées dont l'assise est constituée de Matériaux Traités aux Liants Hydrauliques, recouverte par une couche intermédiaire en Grave Non Traitée de faible épaisseur (~ 12 cm), et d'une couche de base en matériaux bitumineux.



1.5.1 Mode de fonctionnement

La grande rigidité des MTLH permet d'atténuer fortement les contraintes verticales transmises au support de chaussée.

La rigidité des couches bitumineuses permet de diffuser, en les atténuant, les contraintes verticales transmises à la couche de GNT. Les efforts induits par les charges roulantes sont repris en traction par flexion dans les couches bitumineuses.

Le rôle de la GNT est de ralentir la remontée des fissures de retrait thermique de la Grave Hydraulique.

Tant que les interfaces entre les couches bitumineuses restent collées, les efforts de traction maximaux se produisent à la base de la couche bitumineuse inférieure.

1.5.2 Mode d'endommagement

Deux modes d'endommagement concourent à la ruine de la chaussée :

- la fissuration longitudinale de fatigue des couches bitumineuses qui favorise les entrées d'eau dans la GNT, altère sa rigidité et la rend plus sensible aux déformations permanentes. Ce phénomène amplifie la fatigue des couches bitumineuses avec une évolution rapide vers du faïençage ;
- la fissuration transversale de retrait thermique du MTLH qui apparaît en surface sous forme de fissures irrégulières, dédoublées donc difficile à étancher.

2 Facteurs influant sur les dégradations

Les structures de chaussée sont conçues pour répondre aux objectifs définis par le Maître d'Ouvrage.

Elles vont se dégrader sous l'action de différents facteurs qui peuvent être classés en trois catégories :

- extérieurs à la chaussée ;
- liés à la structure elle-même, à ses défauts de conception et de réalisation ;
- liés aux matériaux constitutifs.

2.1 Facteurs extérieurs

Le trafic est le premier des facteurs extérieurs provoquant la ruine des chaussées. Il agit d'une part en sollicitant les couches traitées en traction/extension par flexion et en poinçonnant les couches non liées (sol support et GNT), provoquant respectivement fissures et déformations permanentes.

Il peut également susciter l'orniérage par fluage des couches de surface bitumineuses. Les facteurs extérieurs suivants pouvant intervenir à ce niveau sont : une température durablement élevée (période de canicule), une vitesse de sollicitation lente (rampe) ou une zone de fort cisaillement (virage, présence de feux ou stop).

Le trafic exerce également une augmentation de pression dans les fissures où l'eau s'est infiltrée. Par suite, cette eau sous pression attaque les éventuels points faibles des matériaux et de la structure, à savoir décolle les interfaces entre couches, entraîne les fines produites par l'attrition (au niveau de la fissure ou des interfaces), déchausse les granulats.

Les conditions climatiques influent sur le comportement des structures, de façon directe ou induite :

- la pluviométrie influe sur la teneur en eau des sols support et sur leur portance, sur la rigidité des matériaux non traités et sur la dégradation des discontinuités de la structure (fissures, interfaces). L'influence de ce facteur est amplifiée par le profil de la route (remblai, déblai), la nature et la largeur des accotements, l'état du dispositif de drainage et l'état de surface de la chaussée (déjà dégradé ou intact) ;
- les températures estivales augmentent la sensibilité à l'orniérage ou au ressuage des couches de surface ;
- les températures hivernales augmentent la fragilité des couches bitumineuses et les sollicitations au voisinage des discontinuités dans les structures rigides et à assise traitée aux liants hydrauliques ;
- les variations journalières de température influent sur le fonctionnement des structures, notamment en modifiant la cambrure des dalles rigides et leur mode de fonctionnement, ainsi que sur la susceptibilité des matériaux bitumineux dans le cas où une trop grande amplitude journalière de température fragilise le matériau à basse température (pas d'accommodation possible) ;
- les variations saisonnières de température influent elles-aussi sur le fonctionnement de la structure, en agissant sur la rigidité des matériaux pour les structures à couches bitumineuses et sur les conditions d'engrènement pour les structures à couches traitées aux liants hydrauliques ;
- l'ensoleillement et l'exposition aux intempéries provoquent un vieillissement des matériaux, qui se traduit par un durcissement des liants bitumineux et une fragilisation des liaisons granulats/liants ;
- le gel peut, lorsqu'il est intense, provoquer le soulèvement de la structure (principalement sous nos latitudes si ses couches non traitées sont gorgées d'eau) et une dégradation de certains matériaux après de nombreux cycles de gel ;
- plus dommageable, le dégel induit une dégradation accélérée de la structure par chute de portance du sol support (cas des sols fins, des craies ...) ;
- des périodes de grande sécheresse entraînent la dessiccation des sols (surtout ceux présentant des indices de plasticité élevés) et l'apparition de fissures de retrait en surface des chaussées.

2.2 Facteurs liés à la structure

L'épaisseur de la structure est déterminée afin que la chaussée assure la circulation d'un trafic poids lourds sur un sol support donné pendant une certaine durée. Des travaux réalisés selon les règles de l'art intègrent des variations « usuelles » d'épaisseur qui sont prises en compte dans le calcul de l'épaisseur nominale. Toute sous-épaisseur, ponctuelle ou étendue, induit dès l'origine un excès de sollicitation dans la zone sous-dimensionnée, qui se traduit à plus ou moins long terme par l'apparition prématurée de fissures ou de faïençage. Ces sous-épaisseurs sont d'autant plus dommageables que le matériau est rigide.

Les cas les plus fréquents de sous-épaisseurs se rencontrent en traverse d'agglomération, sur giratoire, ou sur plate-forme mal nivelée.

Les conditions de collage entre couches sont également déterminantes sur la durabilité des structures. Celles-ci sont calculées en adoptant des hypothèses de collage représentatives des conditions habituellement rencontrées : par exemple, les couches bitumineuses sont supposées collées sur leur support. Tout défaut de collage entre deux couches supposées solidaires conduit à une sollicitation excessive de chacune des couches de la structure, et donc à leur ruine prématurée. Il n'est pas rare, sur chaussées souples et bitumineuses épaisses sous fort trafic, de rencontrer des fissures longitudinales voire du faïençage dans les bandes de roulement et de mettre en évidence le décollement de la seule couche de surface par carottage.

Un défaut d'accrochage peut résulter de l'absence ou d'un mauvais dosage de la couche d'accrochage, des conditions météorologiques lors de la mise en œuvre (averses) ou de la présence d'une pollution sur la couche sous-jacente avant mise en œuvre.

Les structures rigides et à assise traitée aux liants hydrauliques génèrent quelques jours à quelques mois après leur mise en œuvre des fissures par retrait hydraulique des matériaux traités. Ces fissures ou joints doivent être étanchés et entretenus périodiquement, afin que l'eau ne pénètre dans la structure et n'altère les conditions d'engrènement et d'interface, sous l'effet conjugué du trafic lourd.

Les travaux de type élargissements constituent souvent des points faibles de la structure. Des comportements différentiels entre ancienne chaussée et élargissement peuvent être observés, résultant :

- des matériaux utilisés pour ces élargissements qui ne sont pas nécessairement de même nature que ceux du corps de chaussée ;
- du sol support remanié lors des terrassements des élargissements ;
- des difficultés de mise en œuvre en faible largeur.

Le joint entre élargissement et chaussée ancienne, réalisé à froid, a tendance à s'ouvrir rapidement, puis à s'épauprer, d'autant plus qu'il est placé en bande de roulement et que des dispositions constructives de type redans n'ont pas été adoptées lors des travaux. (cf. § Conception des structures des élargissements).

Les tranchées réalisées dans les chaussées pour les interventions sur réseaux enterrés causent les mêmes types de désordres que les élargissements.

2.3 Facteurs liés aux matériaux

2.3.1 Tous matériaux

La rigidité d'un matériau de chaussée dépend de son taux de compactage. Tous les matériaux requièrent un niveau de compactage minimal, garantissant une rigidité et un comportement en fatigue. Tout défaut de compactage affecte la rigidité du matériau, et par suite suscite une augmentation de la sollicitation induite au passage des charges lourdes. La durée de vie de la chaussée s'en voit réduite. Outre les facteurs extérieurs cités au § 2.1, un matériau non adapté au trafic (squelette non optimisé, teneur en liant ou en sable trop élevée, susceptibilité thermique du liant bitumineux trop forte), peut également être un facteur à l'origine de l'orniérage des chaussées.

2.3.2 Matériaux non traités

Une teneur en eau trop élevée altère les performances mécaniques de ces matériaux, aussi bien en rigidité qu'en résistance à la déformation permanente.

Cette teneur en eau augmente lorsque les couches supérieures ne sont plus imperméables (forte fissuration par exemple), qu'une alimentation en eau peut se faire par un terre plein central et/ou que le dispositif de drainage ne fonctionne pas (problème d'altimétrie, de colmatage des exutoires ...).

La teneur en fines et la propreté (MB) sont également des facteurs déterminants, en ce sens qu'elles contribuent à la rétention d'eau libre et adsorbée et au mouvement d'eau libre (par capillarité), rendant de ce fait le matériau sensible au gel. Cette instabilité conduit généralement à une fissuration des couches supérieures et à l'orniérage.

2.3.3 Matériaux bitumineux

La teneur en liant, dont l'optimum a été déterminé lors de l'étude de formulation du mélange, est également un facteur déterminant.

- Un sous dosage conduit à :
 - une réduction des performances en fatigue (donc à une moindre durabilité des matériaux) ;
 - une moindre maniabilité du mélange (donc à une plus grande difficulté à atteindre la compacité requise) ;
 - une plus grande sensibilité à l'eau (décohésionnement de la liaison liant/granulats) ;
 - dans une moindre mesure, une perte de rigidité du mélange.
- Un sur-dosage en liant a peu de conséquence pour les couches d'assise, mais est plus pénalisant pour les couches de surface où il conduit à :
 - une plus grande sensibilité à l'orniérage et au ressuage ;
 - un état de surface plus fermé (donc une moindre macrotexture) défavorable à l'adhérence sur chaussée humide.

Un manque de fines important conduit à une plus grande sensibilité du mélange à l'orniérage.

La surchauffe des mélanges bitumineux à la fabrication en centrale entraîne un vieillissement prématuré du liant et conduit généralement au désenrobage et à la fissuration des couches de surface.

Le sur-compactage des couches de surface induit un risque accru d'orniérage, et un manque de macrotexture.

Le sous-compactage des matériaux bitumineux peut également conduire, en plus d'un affaiblissement des caractéristiques mécaniques (module et fatigue), à un risque d'orniérage par post-compactage.

L'emploi de bitumes durs, qui s'est développé ces dernières années pour améliorer la résistance à l'orniérage des couches de roulement et rigidifier les couches d'assises, conduit généralement à une plus grande sensibilité des matériaux aux basses températures, ce qui peut poser problème dans les zones à forts écarts thermiques. Cela se traduit alors par l'apparition en surface de la chaussée de fissures orientées de façon aléatoire, dans et hors bandes de roulement, initiées par le haut de la couche de roulement. Cette fissuration peut être aggravée dans les bandes de roulement sous l'effet du trafic lourd.

Cette fragilité du matériau bitumineux face aux températures les plus basses peut également se rencontrer pour des couches de surface élaborées à partir d'agrégats d'enrobés (bitume résultant après mélange plutôt dur), ou ayant fait l'objet de thermo-recyclage (thermoreprofilage ou thermo-régénération), pour peu que les études préalables n'aient pas suffisamment anticipé ce phénomène.

2.3.4 Matériaux traités aux liants hydrauliques

Un sous-dosage en liant hydraulique (ou en eau) conduit à une moindre performance du mélange, aussi bien en rigidité qu'en résistance en traction. Cette réduction des performances mécaniques conduit à une réduction importante de la durée de vie.

Un sur-dosage en liant hydraulique rend le matériau plus rigide et plus résistant à la traction ; mais l'expérience montre que :

- le délai de maniabilité est réduit ;
- la prise hydraulique s'effectue plus rapidement, ce qui a pour conséquence d'augmenter la fissuration de retrait ;
- la rigidité croît plus vite que la résistance en traction, ce qui a pour effet de fragiliser le matériau, de le rendre moins durable et plus sensible aux surcharges.

Le sur-dosage en eau conduit à une diminution des performances mécaniques, tandis qu'un sous-dosage réduit le délai de maniabilité.

Les conditions de mise en œuvre sont déterminantes sur la durabilité de ces matériaux :

- la dessiccation de la partie supérieure de la couche doit être évitée par mise en œuvre de couche de cure ;
- le sur-compactage et/ou l'apport de couche en faible épaisseur peuvent provoquer le feuilletage de la partie supérieure de la couche ;
- les travaux en arrière saison et en hiver sont à proscrire (risque de gel) ;
- un délai minimal doit être respecté avant remise sous circulation.

Chapitre 2 :

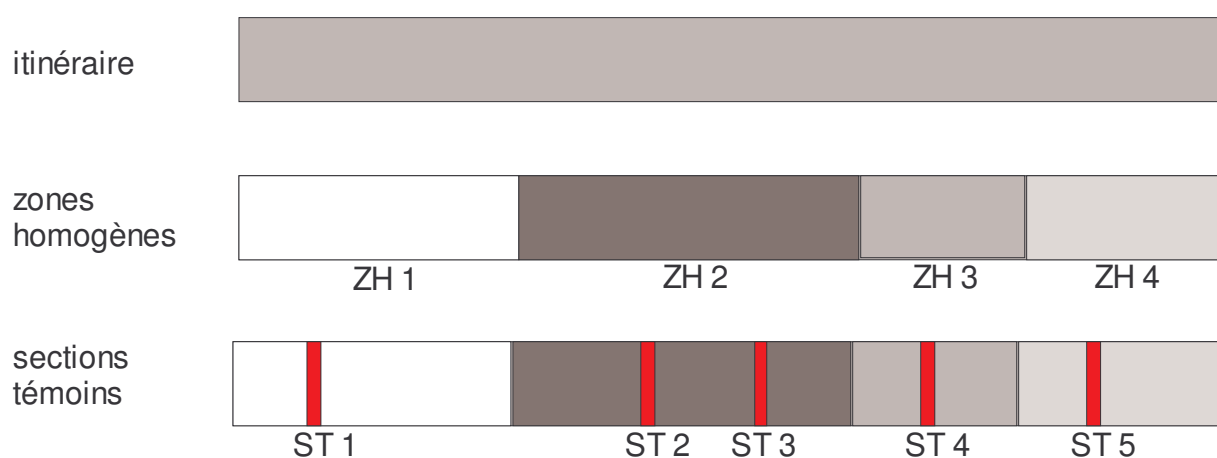
Recueil des données d'auscultation

1 - Principes de l'auscultation des chaussées

L'auscultation doit permettre de déterminer des propriétés des couches de chaussées à partir de mesures. Elle a pour objectif d'apporter des éléments d'information nécessaires aux décisions à prendre en matière d'entretien².

L'auscultation se décompose en 3 phases :

- phase 1, on recueille des informations globales ou à caractère continu sur l'itinéraire ;
- phase 2, on découpe l'itinéraire étudié en zones homogènes ;
- phase 3, on cherche à préciser le comportement des zones homogènes par des analyses plus fines sur des sections témoins extraites des zones homogènes (selon leur longueur). On applique à ces sections témoins un programme d'investigations détaillées, afin de connaître les propriétés et les défauts des couches de la chaussée. Dans un second temps, on vérifie que le résultat de la section témoin est bien transposable à l'ensemble de la section homogène.



Les 3 phases de l'auscultation

2 - Phase 1 - Recueil des informations globales ou à caractère continu

Dans l'état actuel des procédés d'investigation sur chaussée, on appréhende de manière continue ou quasi continue les types d'informations suivants :

- l'historique de la chaussée ;
- le trafic ;
- l'environnement ;
- le climat ;
- l'état visuel de surface (dégradations, orniérage) ;
- la déformabilité de la chaussée sous charge (déflexion, éventuellement rayon de courbure) ;
- les épaisseurs des couches.

² Voir Bull. liaison Labo P. et Ch. 153 janv. 1988 « Remise en état des chaussées – J. Bonnot »

2.4 L'histoire de la chaussée

Les éléments historiques de la chaussée, qui concernent la structure et sa réalisation (âge, trafic cumulé, constitution, qualité de la plate-forme, épaisseur théorique et de chantier de l'assise, qualité de fabrication et de mise en œuvre des matériaux, entretiens réalisés, comportement aux hivers rigoureux, etc.), revêtent un intérêt tout particulier pour l'analyse de l'état résiduel des chaussées étudiées.

Ces renseignements sont normalement disponibles auprès des gestionnaires du réseau.

On veillera à recueillir les données suivantes :

- les informations issues des « Banques de données routières » ;
- les schémas d'itinéraire « Point Zéro » (figure 1), ou « Plan de recollement » dans le cas où ils sont disponibles ;
- les sollicitations : trafic – comptages poids lourds – cumul, barrières de dégel, vocations particulières (tourisme, usine, carrières) ;
- les caractéristiques du support de chaussée ainsi que l'environnement : géologie, hydrogéologie, plate-forme, drainage, remblais – déblais, points particuliers ;
- les données sur les dégradations : descriptif, évolution, comportement pendant et après les hivers ;
- les entretiens : nature et importance, efficacité, période de renouvellement, zones particulières.

Itinéraire : RENNES - BREST		RN : 12		Chaussée : NORD		Départ
Intersections Ouvrages Points singuliers	Buse					
Repères	Buse					
Agglomérations	Buse					
Largeur	Section déviatio					
Tracé en plan	→					
Profil en long	→					
Déblai-Remblai	D	r	T.N	R	d	r
Accotements	TPC	2.50 A.S.			2.50 R	2.50 A.S.
	D	2.50 A.S.				3.00 A.S.
Drainage-Obstacle	TPC	[Diagramme de drainage]				
	D	[Diagramme de drainage]				
Structure	<p>5% 8cm BB 0/14" 25cm G.C. 0/20" 15.5cm G.C. 0/15"</p>					
Soil Classe RTR	B5-B6		D3-D4		C2-C3	
Couche de Forme	Déflexions	2.50	moy: 0.75mm			1.25r
	Epaisseur					
	Nature					
Elargissement	G					
Epaulement	D					
Couche de Fondation	Date/Tonnage	1/07/83 2150T 800	4/07/83 2595T 820	5/07/83 1907T 440		
	% Liant	3.44 - 3.21 - 2.97	3.20 - 3.07 - 2.96	3.20 - 3.05 - 3.00		
	W %	6.03 - 5.30 - 4.20	6.40 - 5.70 - 5.30	6.30 - 6.60 - 6.10		7.6
	Granulo					
	Densité	moy: 2.40 γ: 0.020	2.45 0.042	2.45 0.044		
	Epaisseur					
	Météo	Beau Temps	Beau Temps	BT		
Observations		Plancher de pontage S.D. 2.4%		Bilan ciment 3.20%		
Couche de Base	Date/Tonnage	28/07/83 4132T 800	28/07/83 5497T 820			
	% Liant	3.34 - 3.19 - 2.86	3.41 - 3.30 - 3.20			
	W%	7.10 - 6.96 - 6.76	6.40 - 6.00 - 5.50			
	Granulo					
	Densité		moy: 2.51 γ: 0.012			
	Epaisseur					
	APL	Moy: 8.06 γ: 3.21	valeurs à 6: 22.5% à 13: 92.5% à 20: 97.5%		8.93 - 13.06 - 22.5 - 92.	
Météo	Beau Temps	Beau Temps				
Observations						
Couche de Roulement	Date/Tonnage	13/09/83 871T 200	9/09/83 1207T	8/09/83 1480T 100		
	% Liant	5.36	5.73 - 5.11 - 4.79	5.38 - 5.28 - 5.10		
	% Fines		9.6 - 8.16 - 7.4	8.3 - 7.17 - 7.1		
	Granulo					
	Densité		moy: 2.62 γ: 0.033		2.61 0.033	
	Epaisseur		moy: 7.5cm		18cm	
	APL	Moy: 5.18 γ: 1.97	valeurs à 6: 172.5 à 20: 100%		15.18 - 3.33 - 750 - 15	
	Météo	B.T	Beau Temps		Beau Temps	
Observations						
Observations						

Figure 1 – Exemple de Schéma itinéraire « Point zéro »

2.5 Trafic

La connaissance du trafic poids lourds est indispensable pour :

- établir le diagnostic : expliquer et comprendre l'évolution et la dégradation de la structure de chaussée, évaluer le dommage structurel théorique en fonction du nombre de charges de référence ayant circulé sur la structure ;
- proposer des solutions de conception : calculer le nombre de charges de référence pour la durée de service retenue, déterminer le type et l'épaisseur de la couche de surface qui sont fortement fonction du trafic poids lourds journalier moyen (MJA).

Les poids lourds, conformément à la norme NF P 98-082 de janvier 1994, sont les véhicules de plus de 35 kN de Poids Total Autorisé en Charge³.

Deux notions sont retenues pour évaluer le trafic supporté par une route :

- le trafic journalier déterminé à partir de la MJA de la voie la plus chargée exprimé en classe de trafic Ti (tableau 1) ;
- le trafic cumulé correspondant au nombre de poids lourds par sens sur la voie la plus chargée pendant la durée de dimensionnement de la chaussée.

Classe	T5		T4		T3		T2		T1		T0		TS		TEX
					T3-	T3+	T2-	T2+	T1-	T1+	T0-	T0+	TS-	TS+	
MJA	0	25	50	85	150	200	300	500	750	1200	2000	3000	5000		

Tableau 1 - Définition des classes de trafic

Le trafic cumulé des poids lourds, TC_{PL} , est calculé :

- soit à partir d'une progression arithmétique r : $TC_{PL,arith} = 365 \times MJA \times d \times \left(1 + \frac{(d-1) \times \tau}{2}\right)$,
- soit à partir d'une progression géométrique q : $TC_{PL,géom} = 365 \times MJA \times \frac{(1+q)^d - 1}{q}$,

avec :

- MJA : Moyenne Journalière Annuelle, représentant le nombre moyen de PL par jour, par sens, lors de la mise en service, éventuellement pondéré par la largeur de la chaussée et le nombre de voies de circulation par sens ;
- d : nombre d'années de durée de service ou d'ouverture à la circulation ;
- τ : taux de croissance linéaire annuelle du trafic à la mise en service ;
- q : taux de croissance géométrique annuelle du trafic à la mise en service.

Dans le cas des chaussées bidirectionnelles on retiendra la règle suivante pour calculer la MJA :

- largeur inférieure à 5 m : 100 % du trafic total PL dans les deux sens ;
- largeur comprise entre 5 et 6 m : 75 % du trafic total PL dans les deux sens ;
- largeur supérieure à 6 m : 50 % du trafic total PL dans les deux sens ou comptage sur la voie la plus chargée.

³ Nota : avant 1994 un poids lourd était un véhicule de plus de 50 kN de Charge Utile, la règle de passage, entre un véhicule de plus de 50 kN de CU et un véhicule de plus de 35 kN de PTAC, communément admise est $N_{PTAC} = 1,25 N_{CU}$

Dans le cas des routes à chaussées séparées, en l'absence de comptages spécifiques on retiendra :

- En rase campagne

Chaussées à 2 x 2 voies

Voie lente 90 % du trafic PL pour le sens considéré

Voie rapide 10 %

Chaussées à 2 x 3 voies

Voie lente 80 % du trafic PL pour le sens considéré

Voie médiane 20 %

Voie rapide 0 %

- En péri-urbain

Chaussées à 2 x 2 voies

à définir au cas par cas

Chaussées à 2 x 3 voies

Voie lente 65 % du trafic PL pour le sens considéré

Voie médiane 30 %

Voie rapide 5 %

Le trafic poids lourds cumulé est alors converti en un nombre équivalent NE de passages de l'essieu de référence de 130 kN :

- $NE = TC_{PL} \times CAM$

– CAM : Coefficient d'agressivité structurelle moyenne des poids lourds.

Le tableau 2 nous renseigne sur les coefficients d'agressivité retenus dans le catalogue des structures types de chaussées neuves de 1998 pour les voies du réseau structurant (VRS) et non structurant (VRNS).

Rappelons que le coefficient d'agressivité moyen du poids lourd (CAM) peut être déterminé à partir des stations de pesage en marche et des matériaux de structure.

Matériaux	Catégories de voies	
	VRS	VRNS
Bitumineux	0,8	0,5
Traités aux Liants Hydrauliques	1,3	0,8
Graves non traitées	1,0	1,0
Sols supports (1)	1,0	1,0

(1) pour les trafics PL inférieurs à 150 PL/j/voie

$$CAM = 0,004 \times MJA_{PL} + 0,4$$

Tableau 2 - Coefficient d'agressivité structurelle moyenne (CAM)

2.6 Environnement de la chaussée

Les conditions d'environnement des structures de chaussées ont une incidence sur leur évolution et peuvent expliquer des disparités d'état, mais le coût de recueil de ces données conduit à se limiter en phase 1 à la description du site et aux paramètres liés à la faisabilité des solutions de travaux.

2.6.1 Site

Caractérisé par :

- la largeur de la chaussée, le nombre de voies ;
- la largeur des accotements, leur nature et leur imperméabilité ;
- la situation par rapport au terrain naturel (déblai-remblai) ;
- l'assainissement de surface de la chaussée (collecte et évacuation des eaux de ruissellement) ;

- les fossés : présence ou non ; état (curé ou non), profondeur (inférieure ou supérieure à 0,7 m), points hauts, points bas ...

2.6.2 Contraintes géométriques ayant une incidence sur la faisabilité et le choix des solutions de conception

Ces données doivent être recueillies auprès du MO, notamment celles concernant :

- le niveau de surface à respecter (OA – seuils en traverse, ...) ;
- les corrections de profil en travers (tracés sinueux) ;
- la profondeur de décaissement (présence de réseaux enterrés) ;
- les possibilités de calibrage en largeur (type de profil de plate-forme, accotements, plantations, ...).

2.6.3 Drainage – Assainissement

Comme le rappelle la figure 2, le drainage a pour objectif de collecter et d'évacuer les eaux internes de la chaussée. Les matériaux de chaussées nettement plus perméables que certains sols support ou accotements, peuvent devenir des pièges à eau qui vont mettre en péril la structure de chaussée.

On s'attachera à noter la présence ou non de dispositif de drainage (drains latéraux et transversaux, exutoires). Les carottages et les sondages peuvent renseigner sur l'efficacité du drainage.

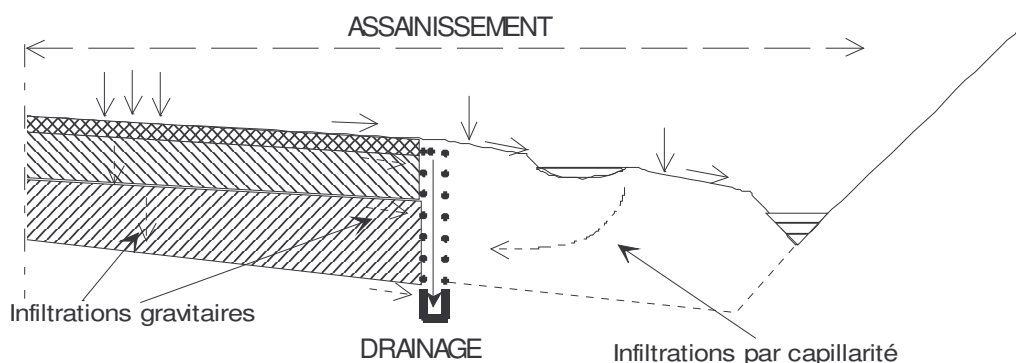


Figure 2 – Distinction entre les fonctions de drainage et d'assainissement routier

2.7 Climat

On veillera à recueillir les données ou informations suivantes :

- pluviosité au cours des derniers mois (et moyennes mensuelles pluriannuelles) ;
- températures estivales (si problème d'orniérage et/ou de ressuage) : historique sur les derniers mois (voire plusieurs années), valeurs des températures maximales ;
- températures hivernales (si problèmes de fissuration thermique, de risques de gonflement en période de gel, de fissuration et d'arrachement au dégel) : historique sur les derniers mois (voire plusieurs années), valeurs des températures minimales, intensité des derniers gels et périodicité (apparition de dégradations consécutives).

2.8 État visuel de surface

Le relevé de dégradations de surface est un des indicateurs de base de l'appréciation de l'état des chaussées. Les réparations sont également relevées car elles sont le signe de l'existence de dégradations antérieures.

L'état visuel est relevé sur chacune des voies lentes suivant la méthode d'essai LPC 38-2⁴. Les informations enregistrées sont représentées sur un schéma itinéraire (figure 3).

Les dégradations sont détaillées dans le « catalogue des dégradations de surface des chaussées » - méthode d'essai LCPC n°52 (complément à la méthode d'essai n°38-2).

2.8.1 Pour les chaussées souples traditionnelles et bitumineuses épaisses

Le type de relevé est M1 pour les trafics \geq T2 et M1 ou M2 si le trafic est $<$ T2. Les dégradations les plus usuelles sont :

- les dégradations traduisant une fatigue du corps de chaussée :
 - orniérage à grand rayon ;
 - fissure longitudinale dans la bande de roulement (photo 5) ;
 - faïençage, dans la bande de roulement ;

Nota : Le faïençage sera détaillé en 2 gravités : faïençage significatif sans épaufrures ni remontées de fines (niveau G1) d'une part, faïençage avec départs de matériaux ou remontées de fines, (niveau G2 ou G3) d'autre part.

- les affaissements de rive (défauts de drainage, stabilité de rive ...) ;
- les dégradations par fluage des couches bitumineuses ;
- les dégradations de surface de la couche de roulement :
 - arrachements, nid de poule ;
 - fissures longitudinales ou faïençage non spécifique aux bandes de roulements ;
 - remontées d'eau.

Le découpage de l'itinéraire en zones homogènes se fait sur la base des dégradations structurelles, en fonction du type et de la gravité de la fissuration et du faïençage (et de sa position), ainsi que du niveau de déformation permanente du profil en travers (orniérage à grand rayon, affaissement de rive).

Les tableaux 3 et 4 précisent les classes de fissuration/faïençage (classes à pondérer en fonction des réparations), ainsi que de déformations permanentes à retenir en fonction de la longueur cumulée affectée (exprimée en pour cent) issue du relevé.

Dans le cas de l'application du mode opératoire M2 dans les bandes de roulement les fissurations longitudinales ainsi que le faïençage sont classés en grave.

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	\geq 20 %			

Tableau 3 - Classement en zones homogènes en fonction du % de zones fissurées et faïencées

Si les réparations affectent plus de 10 % du linéaire, le critère fissuration/faïençage est majoré d'une classe (à l'exception de la classe F1 reclassée en F3).

⁴ Relevé des dégradations de surface de chaussée, méthode d'essais LPC n° 38.2, mai 1997, LCPC, Paris

Si les réparations affectent plus de 30 % du linéaire, la majoration est de deux classes (à l'exception de la classe F1 reclassée en F4).

Nota : Les dégradations localisées aux bandes de roulement priment pour les niveaux F3 à F5 (présomption de fatigue de la structure). Les niveaux F1 et F2 correspondent aux fissures non spécifiques aux bandes de roulement (présomption de vieillissement des matériaux de couche de surface).

Classes d'orniérage		Déformation en mm		
		< 10	10 à 20	> 20
Extension en %	≤ 10 %	O1	O2	O4
	> 10 %		O3	

Classes de l'affaissement		Affaissement en mm		
		< 30	30 à 60	> 60
Extension en %	≤ 10 %	A1	A2	A4
	> 10 %		A3	

Tableau 4 - Classements de déformations permanentes : orniérage dans les bandes de roulement et affaissements de rive

2.8.2 Pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques et mixtes

Le type de relevé est M1 quelque soit le niveau de trafic.

Les dégradations les plus usuelles sur ce type de chaussée sont :

- les fissures transversales détaillées en 4 niveaux de gravités :
 - les fissures franches, colmatées ou non ;
 - les fissures dédoublées ;
 - les fissures dégradées (début de faïençage) qualifiées de graves ;
 - les fissures dégradées et affaissées qualifiées de très graves.
- les fissures longitudinales en axe de voie, hors ou dans la bande de roulement ;
- les faïençages dans les bandes de roulement, et leurs évolutions en dallots ;
- les remontées de laitance et d'eau ;
- l'orniérage par fluage ;
- les dégradation de surface des couches de roulement.

Le découpage de l'itinéraire en zones homogènes se fait sur la base des dégradations structurelles, en fonction du type et de la gravité des fissures transversales, de la fissuration et du faïençage (et de sa position).

Le tableau 5 précise les classes des fissures transversales à retenir en fonction de la longueur cumulée affectée (exprimée en nombre moyen par pas de 100 m) issue du relevé.

Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Transversales / 100 m	graves	≤ 2	> 2	
	très graves	0	≤ 2	> 2

Tableau 5 - Classement en zones homogènes en fonction du nombre par 100 m de fissures transversales pour les chaussées inverses, à assise traitée aux liants hydrauliques et mixtes

En cas de présence :

- de fissuration longitudinale et/ou de faïençage dans les bandes de roulement un nouveau découpage est à entreprendre en retenant les seuils définis au tableau 3 ;

- d'orniérage, reprendre le tableau 4.

2.8.3 Pour les structures inverses

Le type de relevé est M1 quelque soit le niveau de trafic. Les dégradations sont les mêmes que celles rencontrées sur les autres structures à assises traitées aux liants hydrauliques.

2.8.4 Toutes structures

Outre ces dégradations, les réparations seront également relevées.

Des remontées d'eau peuvent se rencontrer en surface de toutes les structures. Elles se caractérisent par l'apparition d'une zone humide à la surface de la chaussée, même plusieurs jours après les précipitations. Elles proviennent d'un cheminement d'eau à l'interface entre deux couches avec sortie d'eau aux points de faible compacité. Les causes probables sont :

- une source d'eau sous le corps de chaussée ;
- un drainage insuffisant ;
- une évaporation intense.

Selon les conditions climatiques qui ont précédé les relevés, il est possible d'observer des remontées d'eau ou de laitance ou de fines.

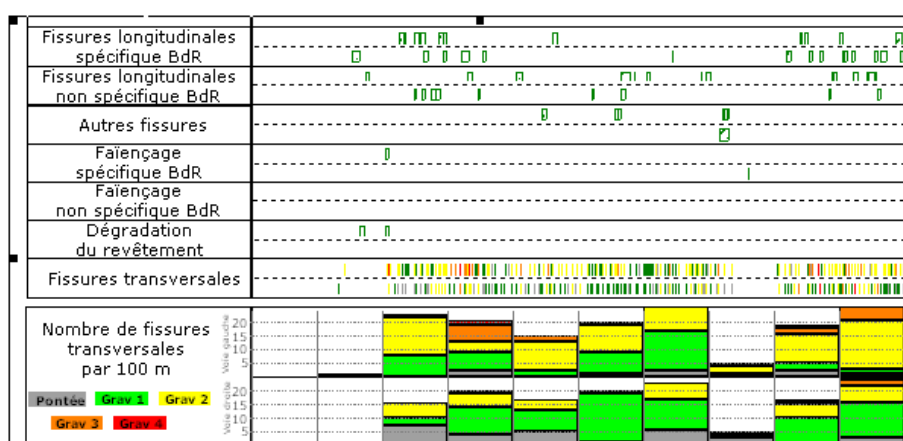


Figure 3 - Exemple de représentation des dégradations sur un schéma itinéraire. Cas d'une structure semi-rigide ou mixte

2.9 Uni transversal et longitudinal

La surface des chaussées peut présenter des irrégularités géométriques, principalement dues à des défauts de construction ou à des dégradations qui apparaissent en cours de vie de la chaussée sous l'effet du trafic PL.

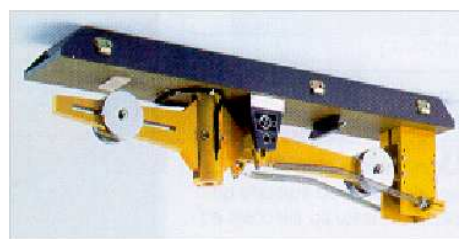
L'ensemble de ces irrégularités plus moins prononcées et répétées constitue l'uni longitudinal et/ou l'uni transversal des chaussées. C'est un indicateur de la qualité d'usage.

2.71. Uni longitudinal

Il est mesuré par différents appareils de mesures tels que l'analyseur de profil en long (APL), généralement en configuration bi-trace selon la méthode d'essai LPC n°46.



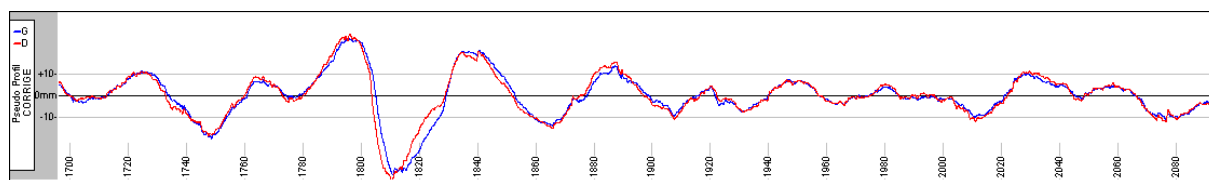
Analyseur de profil en long



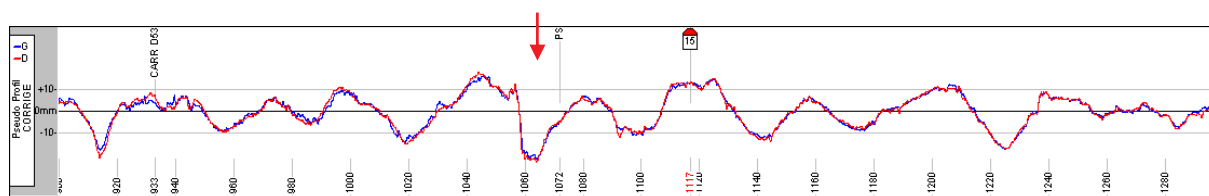
Pendule de l'APL

L'analyse de chaque profil relevé passe par le calcul d'indices d'uni qui se rapportent à trois gammes d'ondes : petites (PO), moyennes (MO), grandes (GO).

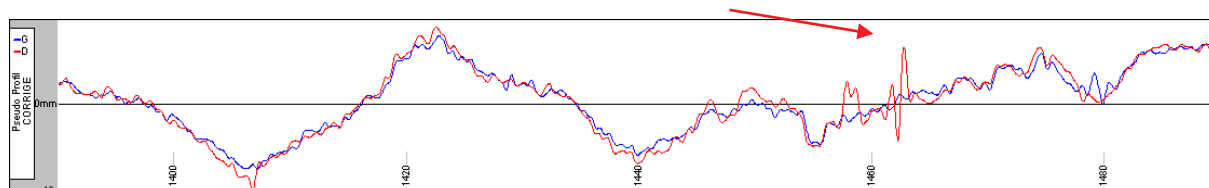
- Des vibrations dans l'habitacle d'un véhicule (phénomène de « tôle ondulée »), parfois quelques secousses d'amplitude supérieure dues à des joints de reprise, des nids de poules, des affaissements de rives, des fissures transversales affaissées ..., sont classés dans la gamme des petites ondes. Ce sont des défauts de longueur d'onde inférieure à 3 m et d'amplitude de l'ordre de quelques mm.
- Les tassements de remblai comme au niveau des ouvrages d'art occasionnant un flottement de la suspension du véhicule sont classés dans la gamme des moyennes ondes. Ce sont des défauts de longueur comprise entre 3 et 10 m et d'amplitude de plusieurs mm, voire de l'ordre du cm.
- Ces flottements peuvent être classés dans la gamme des grandes ondes lorsque la longueur du défaut est comprise entre 10 et 45 m.



Exemple de signal APL (avec GO)



Signal sur PS (MO)



Défaut de PO (fissure affaissée en BDR de rive)



Exemple de FT affaissées (PO)

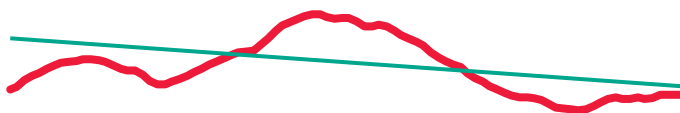
Un uni de mauvaise qualité peut résulter de l'évolution de la chaussée, mais le plus souvent de défauts de mise en œuvre lors de la construction ou de l'entretien. Un phénomène de roulis peut être observé lorsque l'uni est différent entre les bandes de roulements de rive et d'axe (exemple : répandage avec deux finisseurs en parallèle et décalage des signaux APL).

La comparaison des signaux en petites ondes relevés en bande de roulement et en axe de voie permet d'identifier d'éventuels problèmes structurels tels que flaches, fissures affaissées, ...

Les défauts d'uni sont générateurs d'inconfort pour l'usager et peuvent influencer sur la sécurité.

Nota : Sur les structures traitées aux liants hydrauliques, l'uni sur fissures transversales peut être un indicateur de l'évolution de la structure.

2.7.2 Uni transversal



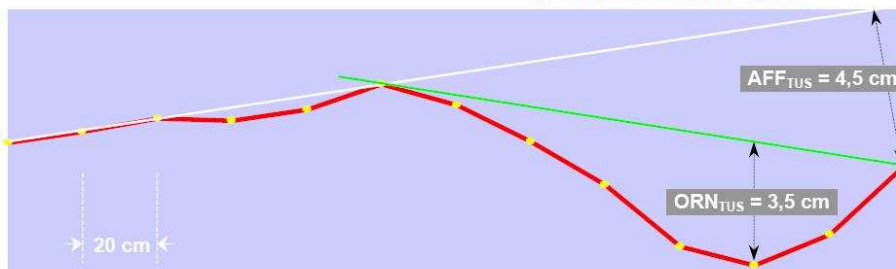
Le relevé de l'uni transversal est réalisé par différents appareils d'auscultation à grand rendement tels que TUS ou PALAS, qui mesurent le profil transversal de la chaussée selon la méthode d'essai LPC n°49.

De façon ponctuelle le profil transversal peut être relevé sous une règle de 3 mètres (norme NF EN 13036-7) ou une règle de 1,5 mètres (norme NF P 98219-5).

Cette mesure permet de repérer les défauts tels que l'affaissement de rive, l'orniérage par déformations permanentes des couches non liées (grand rayon), ou l'orniérage par fluage des couches de surface (petit rayon).



Vue ↗ d'une rive de chaussée déformée et profil TUS ↘ correspondant



2.10 La déflexion de la chaussée sous charge

La déflexion de la structure de chaussée est mesurée dans les bandes de roulement de la voie lente. Si le tracé est sinueux ou si l'état de dégradation est différent par sens, des mesures sur chaque sens de circulation sont indispensables.

Nota : la déflexion est fonction de la vitesse d'application de la charge⁵. Celle retenue pour l'application de ce guide est mesurée par une charge roulante de vitesse inférieure à 20 km/h. Dans le cas d'utilisation d'un autre type de chargement on justifiera la relation d'équivalence entre ces deux types de mesure.

Le paramètre « Déflexion » est peu sensible aux variations de module des matériaux du corps de chaussée, mais sensible aux variations d'épaisseurs et très sensible aux variations de portance du support. Les conditions hydriques pendant les deux mois précédents les mesures doivent être prises en compte lors de l'interprétation des mesures.

Dans le cadre de l'évaluation de la qualité résiduelle des structures traitée par ce document, il est recommandé de réaliser les mesures en dehors des périodes climatiques de faible pluviométrie et/ou de fortes chaleurs.

La température de référence de dimensionnement étant de 15°C en France métropolitaine, il est souhaitable de disposer de valeurs de mesures de déflexion à cette température par mesure directe ou par correction (cf. § 2.10.2).

2.10.1 Mode d'acquisition du paramètre « Déflexion »

Les mesures peuvent être réalisées :

- *de manière continue* selon le mode opératoire D1(1) de la méthode d'essai LPC 39. Le pas de mesure est fixé par le type d'appareil :
 - Défectographe (NF P 98-200-3 à 5) : les mesures s'effectuent simultanément sur les deux bandes de roulement de la voie auscultée à une vitesse inférieure à 10 km/h. Le pas de mesure est constant et inférieur 5 m. Le type de défectographe doit être adapté au type de structure. Si ce n'est pas possible (alternance de structures de types différents), on devra en tenir compte dans l'interprétation du paramètre, en particulier lors de la modélisation.
 - Curviamètre (NF P 98-200-7) : la mesure ne s'effectue que sur la bande de roulement côté rive à une vitesse de l'ordre de 18 km/h. Le pas de mesure est de 5 m.

⁵ Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées N° 62 nov. Déc. 1972 – Utilisation des mesures de déflexion pour le dimensionnement et la surveillance des chaussées – Ph. Léger ; P. Autret



Défectographe



Curviamètre

- de manière ponctuelles à l'aide :
 - de la poutre Benkelman (norme NF P 98-200-2) sur les chaussées souples traditionnelles, inverses et bitumineuses épaisses,
 - du FWD (déflectomètre à masse tombante) sur tous les types de chaussées.



FWD (déflectomètre à masse tombante)

Le pas de mesure, qui est à adapter à l'hétérogénéité visuelle de la chaussée, doit être inférieur ou égal à 50 m.

Les mesures sont reportées sur un schéma-itinéraire (figure 4).

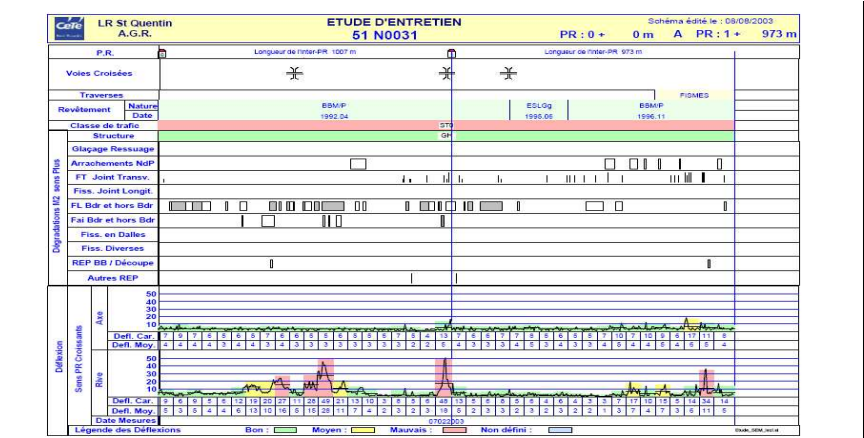


Figure 4 - Exemple de déflectogramme sur schéma-itinéraire

2.10.2 Valeurs caractéristiques pour le paramètre déflexion

- La moyenne des déflexions maximales (d_m) ;
- L'écart type des déflexions maximales (σ) ;
- Le seuil caractéristique à 97,5 % des déflexions maximales (d_c) ;

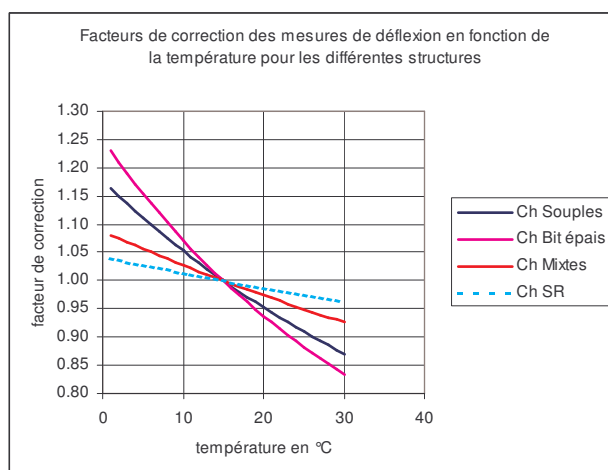
Nota : les mesures de déflexion sont fonction de la température dans les matériaux bitumineux, elles peuvent être corrigées pour être ramenées à la température conventionnelle de 15°C à l'aide de la formule suivante⁶ :

$$D_{15^{\circ}\text{C}} = \frac{D_T}{1 + K \times (T - 15) / 15}$$

avec :

- $D_{15^{\circ}\text{C}}$: déflexion à 15°C ;
- D_T : Déflexion mesurée à la température T (relevée à mi-hauteur des matériaux bitumineux) ;
- K : coefficient fonction du type de structure.

Type de structure	K
Souple	0,15
Bitumineuse épaisse	0,20
Mixte	0,08
Semi-rigide	0,04



2.10.3 Déflexion prise en compte pour la modélisation de la structure, correction des mesures de déflexion réalisées au déflectographe 03

Des études menées à partir de capteurs ancrés sur différentes structures de chaussées ont montré que les déflexions mesurées aux déflectographes sont fonction de la rigidité de la structure et de la géométrie de l'appareillage de mesure. Ainsi pour les mesures au déflectographe 03 les déflexions mesurées doivent être corrigées en prenant en compte la déformabilité D de la structure pour fournir une valeur de déflexion corrigée, plus représentative de la rigidité vraie de la chaussée :

$$D = EH^3 / 12(1 - \nu^2)$$

où :

- E : module de la couche traitée en MPa ;
- ν : coefficient de Poisson ;
- H : épaisseur de la couche traitée en m.

La formule de correction des déflexions mesurées est la suivante :

$$\text{déflexion corrigée} = 0,052 \times E \times H^3 / (12 \times (1 - \nu^2)) + 0,6 \times \text{déflexion mesurée}_{\text{déflectographe03}} + 14$$

Si l'on retient $\nu = 0,25$:

$$\text{déflexion corrigée} = 0,0046 \times E \times H^3 + 0,6 \times \text{déflexion mesurée}_{\text{déflectographe03}} + 14$$

avec : déflexion corrigée \geq déflexion mesurée_{déflectographe 03}, en 1/100 mm.

Dans le cas de structures mixtes l'épaisseur de la couche traitée à retenir est une couche équivalente de matériaux traités aux liants hydrauliques égale à :

⁶ Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées N°153 janv. 1988 – Vérification des méthodes de dimensionnement des chaussées – Sections d'essais.

$$H_{eq,MTLH} = H_{MTLH} + H_{MB} \times \sqrt{E_{MB} / E_{MTLH}}$$

avec :

- $H_{eq,MTLH}$: épaisseur de la couche traitée équivalente constituée de matériaux traités aux liants hydrauliques
- H_{MTLH} : épaisseur de la couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques
- H_{MB} : épaisseur de matériaux bitumineux
- E_{MB} : module des matériaux bitumineux
- E_{MTLH} : module des matériaux traités aux liants hydrauliques

Nota : Cette relation n'est applicable qu'à la condition que l'interface supérieure de la couche de matériaux traités aux liants hydrauliques soit collée. Dans les autres cas l'on ne retiendra que l'épaisseur de matériaux aux liants hydrauliques.

Dans le cas des structures bitumineuses épaisses constituées par différents couches de matériaux bitumineux le module retenu E_1 est le module pondéré par l'épaisseur :

$$E_1 = \frac{\sum E_i \times h_i}{\sum h_i}$$

2.10.4 Classes de déflexion

Comme indiqué précédemment, la valeur caractéristique de la déflexion constitue un indicateur du comportement mécanique de l'ensemble structure/support de chaussée. Cet indicateur fonction du type de la chaussée est lié généralement à une classe de déflexion. Le tableau 6 précise les classes de déflexion retenues en fonction de la valeur caractéristique issue des mesures.

Classes	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 19	de 20 à 29	de 30 à 44	de 45 à 74	de 75 à 99	de 100 à 149	de 150 à 199	de 200 à 299	≥ 300

Tableau 6 - Classes de déflexion caractéristique

2.11 Rayon de courbure ou Courbure de la chaussée sous charge

Le passage d'une charge engendre en un point d'une chaussée un déplacement vertical, la déflexion, qui est fonction de la distance de la charge mobile au point considéré. Cette déflexion passe par un maximum d pour une certaine position de la charge mobile. Au voisinage de ce point de déflexion maximale, la déformée de la chaussée peut être caractérisée par son rayon de courbure R (figure 5).

La déflexion d donne une indication sur la rigidité globale de la chaussée. Par ailleurs, le produit des deux grandeurs R et d permet de caractériser la rigidité relative du corps de chaussée par rapport au sol de fondation et de ce fait peut être utilisé dans l'évaluation de la qualité des chaussées à couche de base traitée⁷.

⁷ Projet de Mode Opérateur LCPC – Mesure de la déflexion et du rayon de courbure - 1979

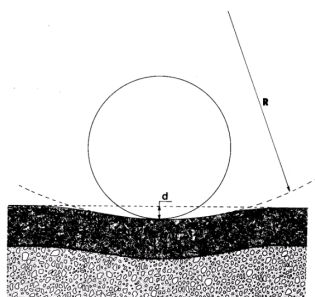


Figure 5 - Déflexion et Rayon de courbure de la déformée sous une charge roulante

Le rayon de courbure est plus sensible que le paramètre déflexion aux variations :

- de qualité des couches traitées (MLTH, Grave Bitume), en particulier pour la partie supérieure des couches de base (MLTH) ;
- d'épaisseurs des assises traitées (MLTH, GB) ;
- des conditions d'interface des couches ;
- de températures des couches bitumineuses.

Ce paramètre sera représentatif⁸ :

- pour les chaussées bitumineuses épaisses et les structures mixtes de l'évolution par fatigue du module des couches bitumineuses, sous réserve de bien intégrer les conditions de fonctionnement (température, fréquence) ;
- pour les structures à assise traitée aux liants hydrauliques des défauts de qualité en place des matériaux traités ou des défauts d'interface.

Le rayon de courbure nécessite de bien connaître les conditions de mesures (températures dans les couches, vitesse d'application de la charge et comportement des matériaux bitumineux en fonction de ces paramètres). L'interprétation des mesures de rayon de courbure devient délicate lorsque la température moyenne des matériaux bitumineux est supérieure à 25°C (ou la température de surface supérieure ou égale à 35°C).

2.11.1 Mode d'acquisition du paramètre « rayon de courbure »

Les mesures peuvent être réalisées :

- de manière ponctuelle avec un inclinomètre⁹ (par dérivation d'ordre 1) ;
- de manière continue par exploitation de l'enregistrement du bassin de déflexion du déflectographe (par dérivation d'ordre 2), par un déflectographe équipé d'inclinomètres (par dérivation d'ordre 1) ou par le curviamètre (par intégration).

Nota : le calcul du rayon de courbure conduit à une variabilité du résultat en fonction du mode de mesure d'une part, de la valeur liée à la structure d'autre part.

Pour les chaussées souples et bitumineuses (valeur individuelle de la déflexion supérieure à 20/100 mm), l'exploitation du bassin de déflexion relevé par le déflectographe peut être utilisée de manière fiable.

Pour les chaussées plus rigides (inverses, mixtes, à assise traitée aux liants hydrauliques ...), les autres moyens de mesures doivent être utilisés.

Les mesures sont reportées sur un schéma-itinéraire (figure 6).

⁸ Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées N° 62 nov. Déc. 1972 – Utilisation des mesures de déflexion pour le dimensionnement et la surveillance des chaussées – Ph. Léger ; P. Autret

⁹ Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées N°97 sept. Oct. 1978 – Mesure du rayon de courbure des déflexions sur chaussée – Utilisation d'un servo inclinomètre de précision – M. Brengarth ; J.P. Roche

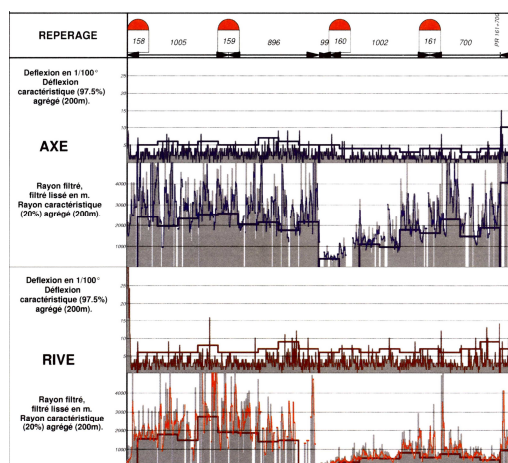


Figure 6 - Exemple de représentation sur schéma-itinéraire des déflexions et rayons de courbure

Avertissement : la représentation sur un schéma itinéraire du rayon de courbure apparaîtra toujours plus hétérogène que le graphe des déflexions.

2.11.2 Valeurs caractéristiques pour le paramètre Rayon de courbure

Le rayon de courbure permet de mieux caractériser l'état des couches liées et de leurs interfaces. L'annexe 1 présente une méthode d'interprétation des résultats.

Compte tenu de la distribution des valeurs, le comportement d'une zone est caractérisé par :

- la valeur médiane du rayon ;
- le pourcentage de valeurs de rayons inférieures aux seuils définis par type de structure ;
- le seuil caractéristique à 20% des rayons (R_c), correspondant au 2^{ème} décile.

2.11.3 Classes de rayon de courbure

Comme indiqué précédemment, le rayon de courbure est un indicateur du comportement mécanique des couches traitées et de leur interface. Cet indicateur fonction du type de la chaussée, est lié généralement à une classe de rayon. Le tableau 7 précise les classes des rayons retenus, calculées par 200 m, en fonction de la valeur caractéristique issue des mesures.

Classes	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 200	200 à 399	400 à 799	800 à 1199	1201 à 1599	≥ 1600

Tableau 7 - Classes de rayons de courbure

2.12 Mesures en continu des épaisseurs des couches par ondes RADAR

Le RADAR permet d'enrichir la connaissance de la structure représentative de la zone : homogénéité longitudinale (si besoin transversale), importance et localisation des hétérogénéités. Ainsi il fournit les épaisseurs des couches de la structure, et la position des défauts les plus importants.

Les mesures RADAR sont toujours recalées par des carottages (ces seuls carottages ne suffisent pas à la caractérisation de la structure).

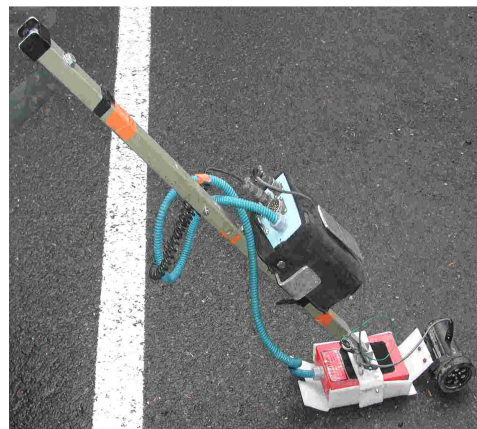
Le RADAR détecte avec une bonne fiabilité :

- 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 (> à 4 cm à $\pm 0,5$ cm) (figures 7 et 9) ;
- la présence de canalisations dans ou sous la chaussée ;
- la présence de cavités dans la chaussée ou dans le support proche sous la chaussée.



Radars pour mesures longitudinales, à gauche antenne de contact de 900 MHz, à droite antenne aérienne de 2 GHz



Radars pour mesures transversales

Le RADAR détecte avec une fiabilité moyenne les interfaces de différentes couches d'un matériau de même nature en particulier lors de différences de compacité (teneurs en vide ou en eau différentes).

L'analyse des échos radar aux interfaces entre les couches permet dans certains cas d'apprécier la qualité de l'interface et, en corrélation avec les carottages, de définir des zones susceptibles de correspondre à des décollements (figure 8).

Actuellement deux types d'antenne RADAR sont utilisés pour détecter les couches de chaussées et le sol support :

- une antenne de 900 MHz de contact (montée sur un chariot très proche de la chaussée) qui permet d'investiguer jusqu'à un mètre de profondeur (structure et sol support) ;
- une antenne de 2 GHz aérienne ou de 2,6 GHz de contact qui détecte les couches de chaussée, cette dernière permet de distinguer les couches de surface.

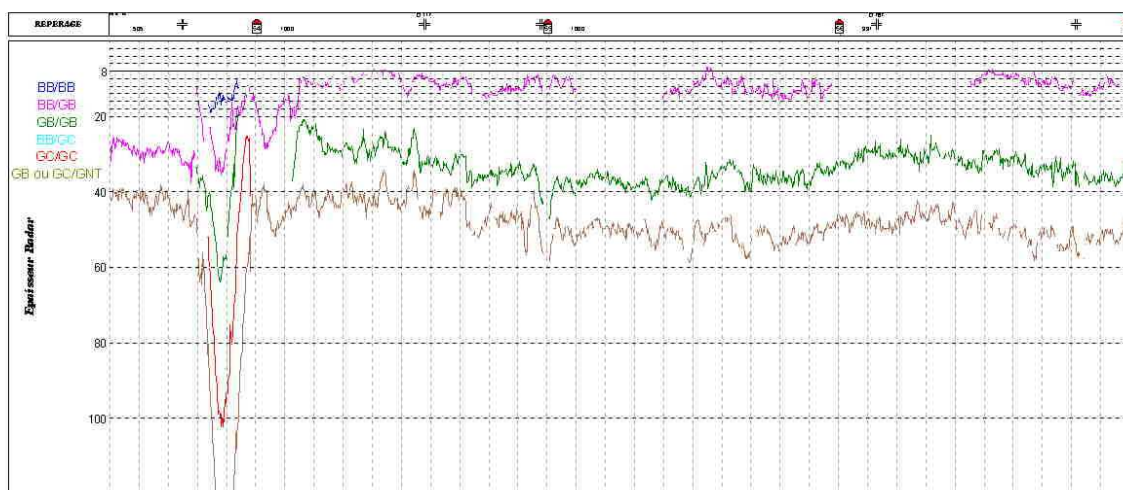


Figure 7 - Exemple de reconnaissance au RADAR dans le sens longitudinal

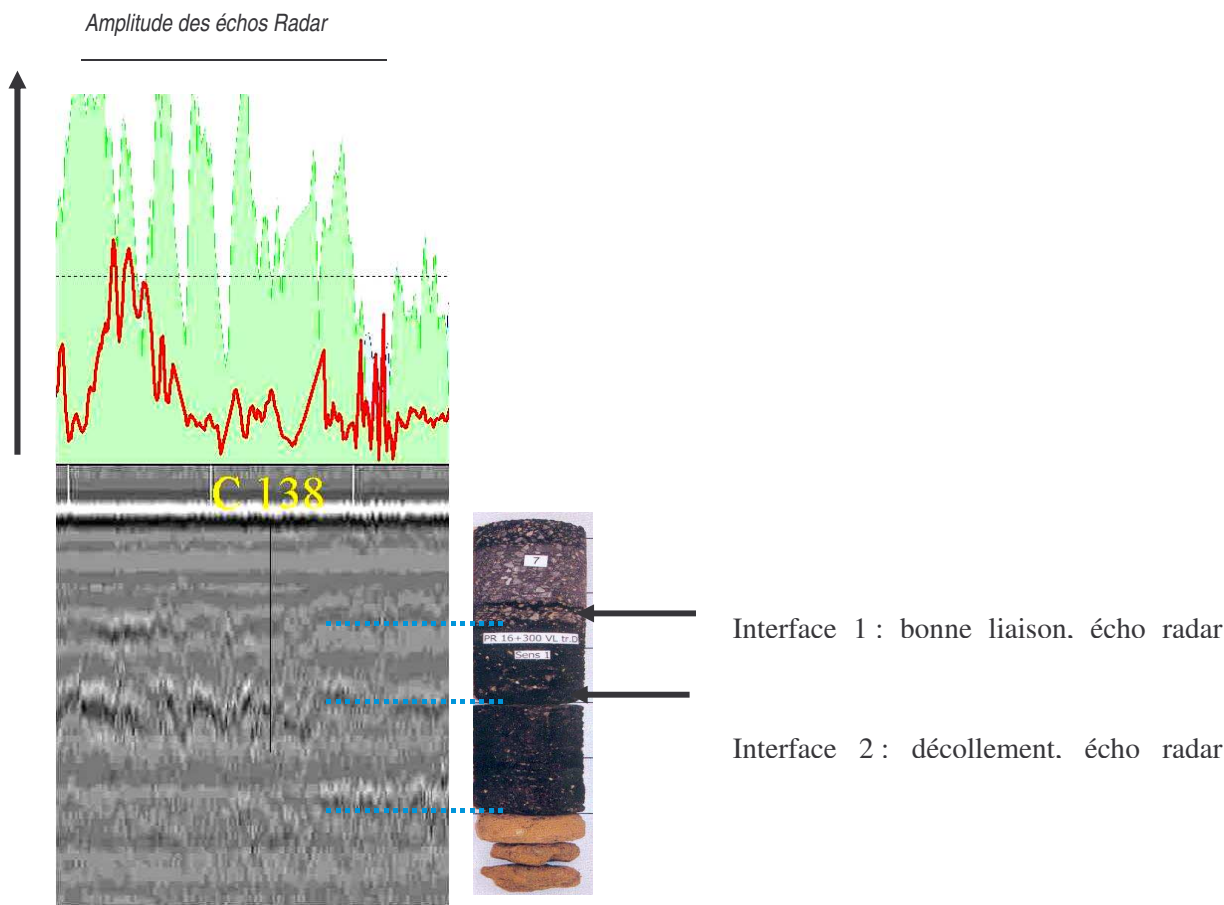


Figure 8 - Exemple de reconnaissance au RADAR des interfaces entre couches

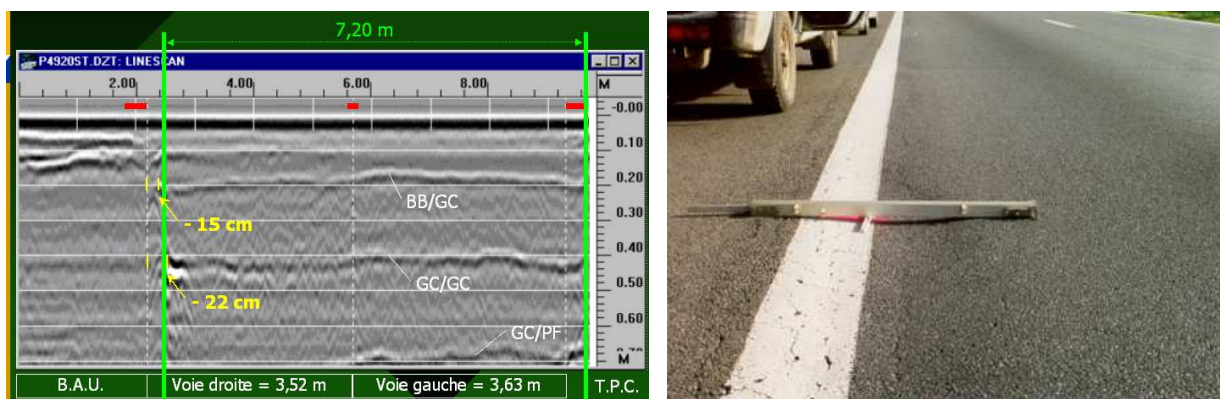


Figure 9 - Exemple de reconnaissance au RADAR dans le sens transversal, mise en évidence de l'absence de couches d'assise près de la bande blanche qui explique l'affaissement en bord

3 Phase 2 - Découpage de l'itinéraire en zones homogènes – Implantation de zones témoins

Une zone homogène fait référence à des données de situations (agglomération ou rase campagne), d'historique (structure, trafic, date de réalisation) et de caractéristiques de la chaussée identiques.

Le découpage en zones homogènes doit être réalisé conformément aux classes prédéfinies précédemment (§ 2.6 ; 2.8 ; 2.9 ; tableaux 3 à 6), à partir de pré-découpages issus :

- des dégradations ;
- des déflexions ;
- éventuellement, des rayons de courbures mesurés.

Les cas particuliers suivants sont à noter :

- pour les chaussées souples traditionnelles, la prise en compte du drainage, de la géométrie et des accotements est importante ;
- pour les traverses d'agglomération, en raison de la complexité des zones d'études, les mêmes principes peuvent être retenus, mais avec des adaptations spécifiques à chaque cas.

3.1 Le pré-découpage à partir des dégradations

Il s'effectue visuellement sur le schéma itinéraire. Celui-ci est découpé en sections élémentaires de longueur constante (généralement 100 m) auxquelles on affecte la classe de dégradation correspondante (FTi, FL+Fai i, Oi, Ai) sous la forme d'un code graphique ou de couleur en fonction de la gravité.

Exemple :

- **Pour les chaussées souples traditionnelles, inverses et bitumineuses épaisses**, les dégradations les plus importantes à prendre en compte pour le découpage en zones sont dans l'ordre :
 - orniérage à grand rayon et affaissements,
 - faïençage et fissurations sur bandes de roulements.
- **Pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques**, les dégradations les plus importantes à prendre en compte pour le découpage sont dans l'ordre :
 - les fissures transversales : leur nombre et leur gravité (nombre par pas de 100 m). Une visualisation des fissures transversales par empilement permet un découpage plus aisé (fig. 3),
 - le faïençage et la fissuration dans les bandes de roulement, la fissuration longitudinale en axe de voie et hors bandes de roulement.

3.2 Le pré-découpage à partir des déflexions

Deux méthodes sont offertes pour réaliser ce premier pré-découpage :

- automatiquement, selon le mode opératoire D1 de la méthode d'essai LPC n°39 ;
- visuellement par rapport aux valeurs caractéristiques du comportement : déflexion caractéristique.

Dans ce second cas le schéma itinéraire est découpé en sections élémentaires de longueur constante (généralement 100 m) auxquelles on affecte la classe de déflexion (Di) correspondante sous la forme d'un code graphique ou de couleur.

Dans le cas particulier des chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, le découpage en zones de comportements différents devra prendre en compte la densité des pics de déflexion c'est à dire le pourcentage de déflexions supérieures à un seuil et la déflexion moyenne (figure 10).

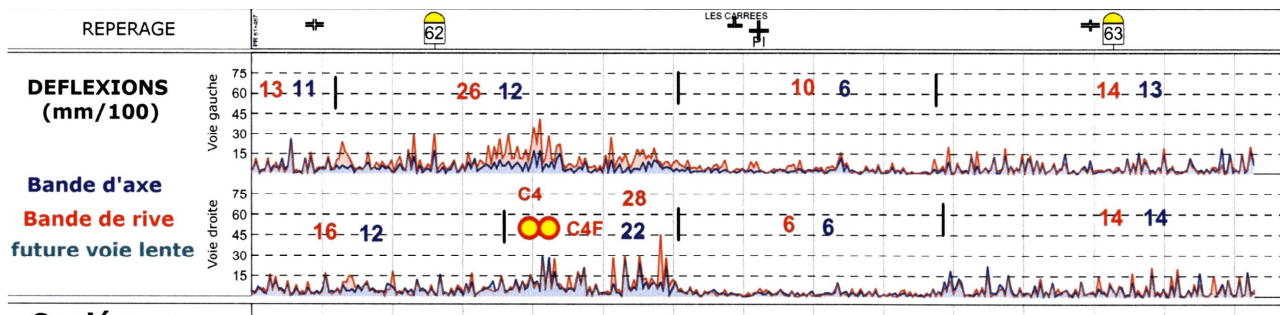


Figure 10 - Zones homogènes avec et sans pics

3.3 Pré-découpage à partir du rayon de courbure

Le schéma itinéraire est découpé en sections élémentaires de longueur constante (généralement 100 m) auxquelles on affecte la classe de rayon (Ri) correspondante sous la forme d'un code graphique ou de couleur.

3.4 Détermination et caractérisation des zones homogènes

L'analyse synoptique des sections élémentaires permet de définir les zones homogènes par agrégation des sections élémentaires (figure 11). Les extrémités de ces zones peuvent être redéfinies plus finement en fonction des dégradations, des déflexions et des rayons de courbure individuels.

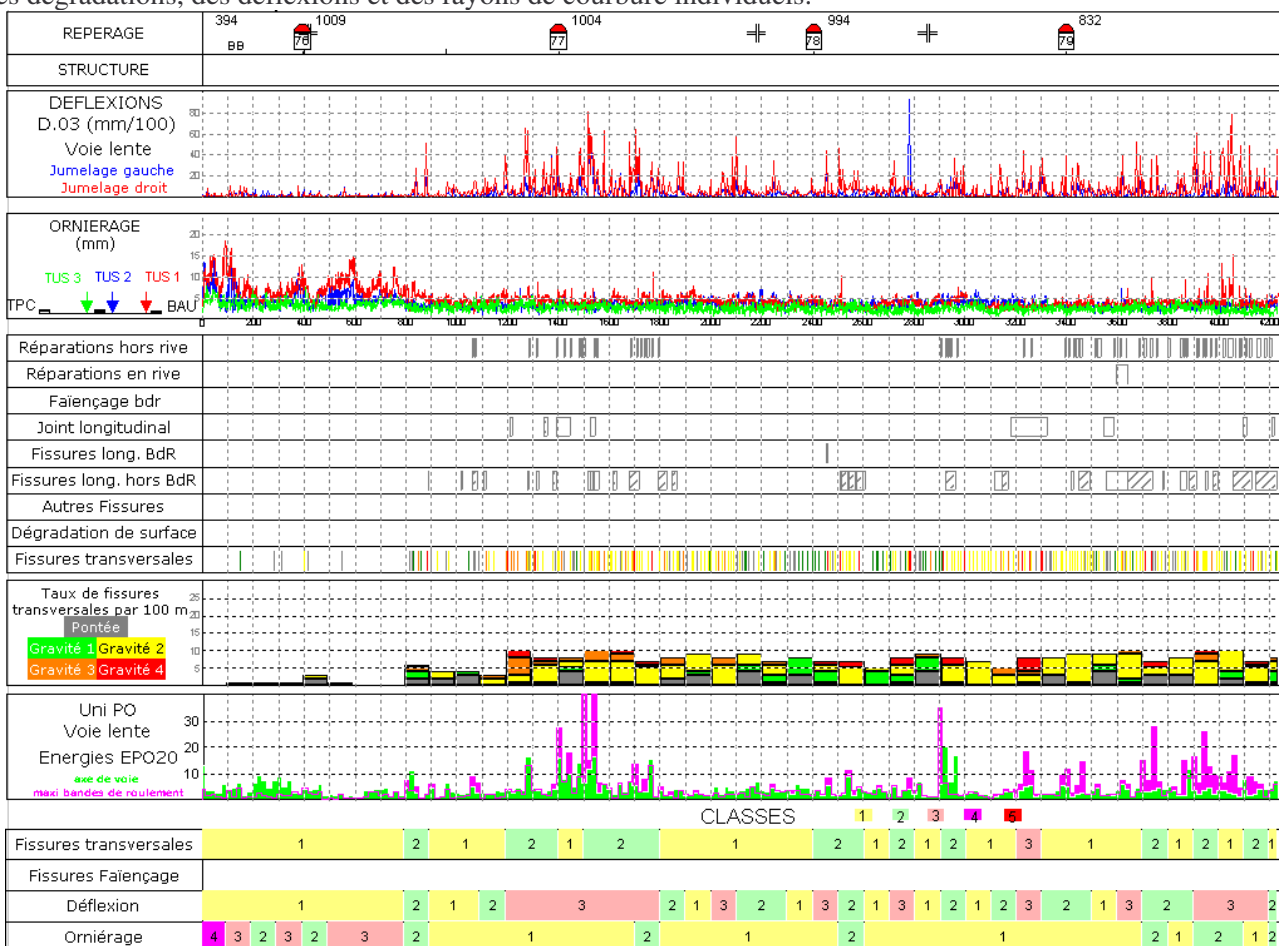


Figure 11 - Exemple de découpage en sections élémentaires suivant les classes des différents paramètres

Pour chaque zone homogène ainsi définie on recalcule les pourcentages de dégradation et valeurs caractéristiques (déflexion et rayon de courbure) pour l'ensemble de la zone.

% Fissures transversales	0,1 0,2	0,5 1,9	0,7 0,3	0,6 0,6
% Fissures Faiçonnage	0			
Déflexion - m+2s	12	41	22	42
Orniérage - m+1.28s	10	6	5	5

3.5 Visite pour implanter les sections témoins et observer les relations entre les paramètres relevés et l'environnement

Les relevés de dégradations sur le revêtement contribuent à l'élaboration du constat sur la qualité de la chaussée. Pour définir une solution il est nécessaire de faire la distinction entre :

- ce qui est imputable au corps de chaussée lui même : défaut de conception du dimensionnement, défaut dans la qualité des matériaux, défaut d'exécution, fatigue sous trafic ;
- ce qui est imputable à des causes externes : drainage du corps de chaussée ...

Dans le premier cas on peut penser qu'une ou plusieurs couches supplémentaires s'imposeraient alors que cela risque d'être inefficace dans le second si l'on ne supprime pas la cause du mauvais fonctionnement de l'assise.

Les observations sur l'environnement de la chaussée permettent d'avoir une première idée des risques de mauvais fonctionnement de l'assise pour les causes externes. Cet aspect est donc important et doit être traité avec beaucoup de soin.

Les points à examiner qui relèvent des observations sur l'environnement sont complexes et multiples. Il n'existe pas de démarche méthodologique d'observation bien codifiée, comme c'est le cas pour les dégradations de surface des chaussées. Néanmoins, le tableau 8 rassemble une liste des observations à réaliser (les deux premières colonnes de ce tableau peuvent constituer une liste non exhaustive pour le chargé d'études).

Domaine observé	Constatations de nature à influencer sur le comportement de la chaussée	Conséquences pour l'analyse de la chaussée et les phases ultérieures de l'étude	
Accotements	<p>Largeur faible (inférieure à 1,5 m).</p> <p>Absence de revêtement ou revêtement dégradé.</p> <p>Jonction rive de chaussée accotement : présence de fissures, d'affaissements ou de forte dénivellations par rapport à la couche de roulement.</p>	<p>Mauvais calage de l'assise traitée, risque de fissuration longitudinale.</p> <p>Pénétration des eaux superficielles, risque de travail de l'assise traitée dans des conditions défavorables par affaiblissement de la portance du support, voire déformation du support.</p> <p>Mauvais fonctionnement mécanique de l'assise près des rives.</p>	
Végétations et plantations	<p>Rangées d'arbres de diamètre important dans les accotements près de la chaussée.</p> <p>Nature des végétations et des cultures sur les terrains en bordure de chaussée (marécages, plantes avides d'eau, etc.).</p>	<p>Actions de racines : fissures.</p> <p>Rétention d'eau, sécurité.</p>	<p>Solution de compromis à trouver entre les considérations techniques, la sécurité et l'environnement</p>
Site	<p>Niveau de la chaussée par rapport au terrain naturel : remblais, déblais, profils mixtes.</p> <p>Configuration du terrain naturel : plat, en rampe.</p> <p>Examen des terrains avoisinant la chaussée – Affleurement des formations géologiques.</p>	<p>Risque de formation de fissures engendrées par des mouvements de sol au niveau des remblais. Zones délicates à la jonction remblai-déblai ainsi qu'à proximité des ouvrages d'art.</p> <p>Écoulement possible de l'eau dans les assises traitées dans le cas de forte rampe. Les zones d'accumulation d'eau constituent des points préférentiels de dégradations.</p> <p>Orientation de l'étude en amont vers des examens au gel (cas de la craie).</p>	
Drainage	<p>Drainage superficiel : pente d'écoulement des eaux résultant des profils en long et en travers ; niveau et état de saignées transversales.</p> <p>Fossés : existence ou non, profondeur et niveau d'eau par rapport à une épaisseur normale de chaussée, état d'entretien, busage des entrées de champs, zones obstruées.</p> <p>Exutoires : vitesse d'évacuation de l'eau après les événements pluviaux, zones de rétention ou de stagnation d'eau, examen soigné nécessaire en site plat.</p> <p>Réseau d'évacuation des eaux pluviales, avaloirs, bordures, examen visuel du bon état.</p>	<p>Pénétration des eaux superficielles, risque de travail "eaux limites" de l'assise traitée, diminution de la durée de vie.</p> <p>Affaiblissement des accotements en stabilité et portance. La formation de frayées de roues de camions augmente encore les difficultés de bon écoulement des eaux.</p> <p>Affaiblissement des conditions d'appui de l'assise traitée, mention fréquente dans les conclusions des études de la nécessité d'un meilleur entretien : curages, approfondissements, saignées.</p> <p>Plus grande nocivité d'avoir des fossés avec de mauvais, ou sans exutoires, que de ne pas en avoir.</p>	

Tableau 8 - Observations sur l'environnement de la chaussée.

Des éléments complémentaires explicatifs pourront être recueillis. Ils donneront le contexte de la situation, explicatif de certaines dégradations pour le diagnostic :

- Rase campagne :
 - relief de l'itinéraire ;
 - plate forme en Terrain Naturel, remblai, déblai ;
 - présence de nappe phréatique, circulation d'eau, efficacité du drainage.
- Route de montagne :
 - hétérogénéité de plate-forme et de support ;

- instabilité de pente, circulations d'eau ;
- état de murs de soutènement.
- Voie urbaine – traverses d'agglomération :
 - hétérogénéité de structures ;
 - hétérogénéité de plate-forme et de support ;
 - réseaux enterrés ;
 - contraintes de seuils.

3.6 Implantation des sections témoins

Ces sections témoins doivent permettre de comprendre les origines des dégradations constatées. Pour cela des essais complémentaires doivent être réalisés.

Les contraintes de sécurité et d'exploitation de la route sont prioritaires dans le choix de l'implantation de ces sections. Une section témoin peut être l'ensemble de la section étudiée.

4 Phase 3 - Investigations complémentaires sur les sections témoins

4.1 Mesures de Rayons de courbure sur zones témoins

Si on ne dispose pas de mesures relevées en phase 1, il est souhaitable de prévoir la mesure de ce paramètre pour la modélisation du comportement des structures bitumineuses épaisses à fort trafic et des structures à assise traitée aux liants hydrauliques ou mixtes.

La densité de points de mesures par zone de 200 m doit être au minimum de 10 compte tenu de la dispersion de comportement pouvant être rencontrée.

4.2 Mesures de déflexions sur fissures transversales

Celles-ci sont intéressantes sur des chaussées présentant des taux importants de fissures transversales pour évaluer le degré d'évolution (transfert de charge, dégradation des matériaux ou du support).

La déflexion est mesurée sur l'about aval de la fissure transversale (par rapport au trafic). La valeur mesurée est comparée à la valeur de déflexion à plus de 2 mètres des fissures transversales (déflexions en centre de dalle).

Le rapport $\frac{\text{déflexion en bord de fissure}}{\text{déflexion en centre de dalle}}$ qualifie l'activité de la fissure. Une fissure est dite « active » lorsque ce rapport est supérieur à 1,5.

Toutefois les valeurs des déflexions sur fissures sont dépendantes du gradient de température dans les couches traitées aux liants hydrauliques, ainsi ces mesures doivent être réalisées en présence d'un faible gradient de température (< 0,8°C/cm).

4.3 Sondages

Des sondages peuvent être réalisés dans le corps des chaussées. Outre les épaisseurs des couches, ceux-ci permettent de prélever la GNT et le sol pour identification en vue de leur classification suivant le GTR. La procédure d'exécution, de prélèvement et d'analyse des échantillons est présentée en **annexe 2**.

Ces sondages doivent permettre de reconstituer une coupe transversale de la chaussée. Ils sont implantés sur chaque zone homogène avec pour objectif de cerner l'état et le comportement de la chaussée (figure 12). Un à deux sondages par zone homogène sont le plus souvent nécessaires pour les études en rase campagne avec un minimum d'un sondage par kilomètre sur les chaussées souples.

Pour les études en traverse d'agglomération, la structure est souvent très hétérogène et le nombre de sondages doit être plus important.

Ces sondages sont indispensables dans les cas :

- de réalisation d'épaulement et d'aménagements ;
- des chaussées souples ;
- d'identification de points singuliers ;
- de caractérisation des sols pour l'étude du comportement au gel des chaussées.

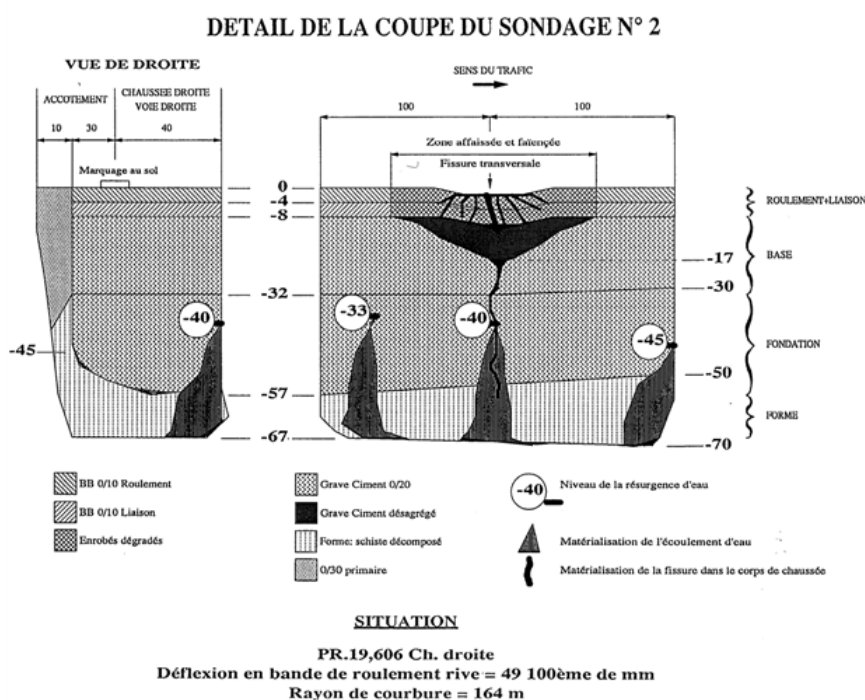


Figure 12 – Exemple de sondage au niveau d'une fissure transversale dégradée d'une structure semi-rigide

4.4 Carottages

Ils ont pour objet :

- de déterminer les caractéristiques générales des couches liées de la section témoin (nature et état des matériaux, épaisseurs, conditions aux interfaces, performances mécaniques) ;
- d'observer l'origine et la propagation des fissures (par le bas ou par le haut) ;
- d'expliquer les défauts des points singuliers.

Les carottages sont réalisés suivant la méthode LPC 43. Le diamètre des carottes est supérieur à 140 mm.

Nota : l'opération de carottage doit faire appel à des matériels en bon état (surtout les carottiers) et un personnel qualifié. Dans le cas contraire le diagnostic peut s'avérer plus pessimiste qu'il ne l'est réellement.


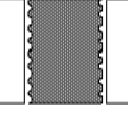

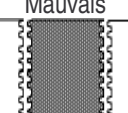
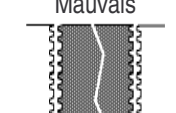
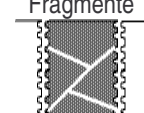
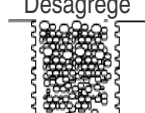
4.4.1 Qualification des matériaux prélevés par carottages et des interfaces

Le relevé des informations lors des carottages se fait selon la méthode LPC n°43 pour la qualification des matériaux et de leurs interfaces (voir annexe 3).

Pour les interfaces, il sera distingué les 3 cas suivants :

Classification de la qualité des interfaces	
Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface

Les matériaux sont classés en cinq catégories : sain, médiocre, fissuré ou mauvais, fragmenté, désagrégé. Cette classification se fera pour chaque sous-couche en tenant compte des 3 éléments suivants : qualité de la carotte, qualité des parois, état de l'interface.

		Classification des matériaux des sous couches				
		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité de la paroi	Lisse	Sain 	Médiocre 	Fissuré 	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	Mauvais 	Mauvais 	Fragmenté 	Désagrégé 

Ces qualificatifs peuvent s'appliquer sur une partie de la carotte lorsqu'elle est d'épaisseur supérieure à 5 cm : ainsi, les parties supérieure et/ou inférieure d'une couche peuvent être désagrégées et la partie centrale de la couche peut être saine.



Carottes sur fissure de retrait et en centre de dalle

4.4.2 Essais sur les matériaux prélevés lors des carottages

Les prélèvements sont soumis à des essais adaptés aux problématiques rencontrées.

4.4.2.1 Matériaux bitumineux

Les essais suivants peuvent être réalisés :

- compacité ;
- composition (éventuellement nature des granulats) ;
- analyse des caractéristiques du bitume (notamment pénétrabilité et Température Bille-Anneau).

Ces essais, surtout sur les bitumes, sont indispensables pour expliquer l'origine des fissures par le haut, les fluages des enrobés et préparer l'étude de formulation pour le recyclage de ces matériaux bitumineux.

4.4.2.2 Matériaux traités aux liants hydrauliques

Les essais suivants peuvent être réalisés : module et résistance en compression diamétrale suivant les normes NF EN 1328-42 et NF EN 13286-43.

En fonction des résistances mesurées en compression diamétrale, les MTLH se classent en 3 états

R _{tb} en MPa	1	1,5	
état	mauvais	moyen	bon

4.5 Essais d'ovalisation¹⁰

Cette investigation, réservée aux routes à fort trafic, permet :

- de vérifier si la structure fonctionne en couches collées ou décollées lorsqu'il y a litige au carottage ;
- de bien caler la modélisation de la structure et de déterminer les elongations à la base de la structure (donc son taux de travail) lorsqu'elle est couplée à la mesure du rayon de courbure et à un essai de module.
- de préciser l'évolution de structures présentant un bon comportement malgré un endommagement théorique élevé.

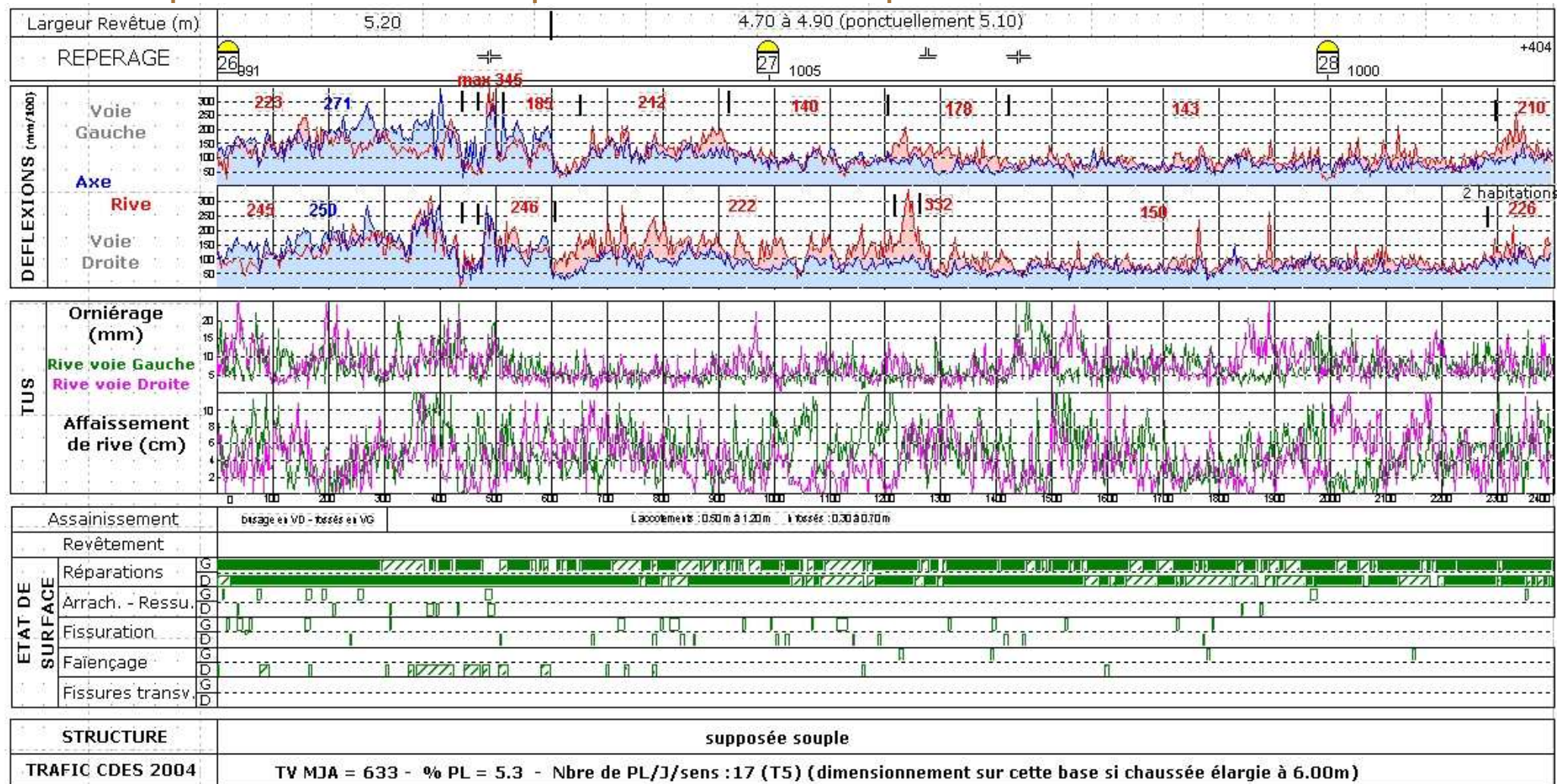
5 Synthèse des différentes données

L'ensemble des données est synthétisé sur des schémas-itinéraires dont des exemples sont donnés dans les pages ci-après.

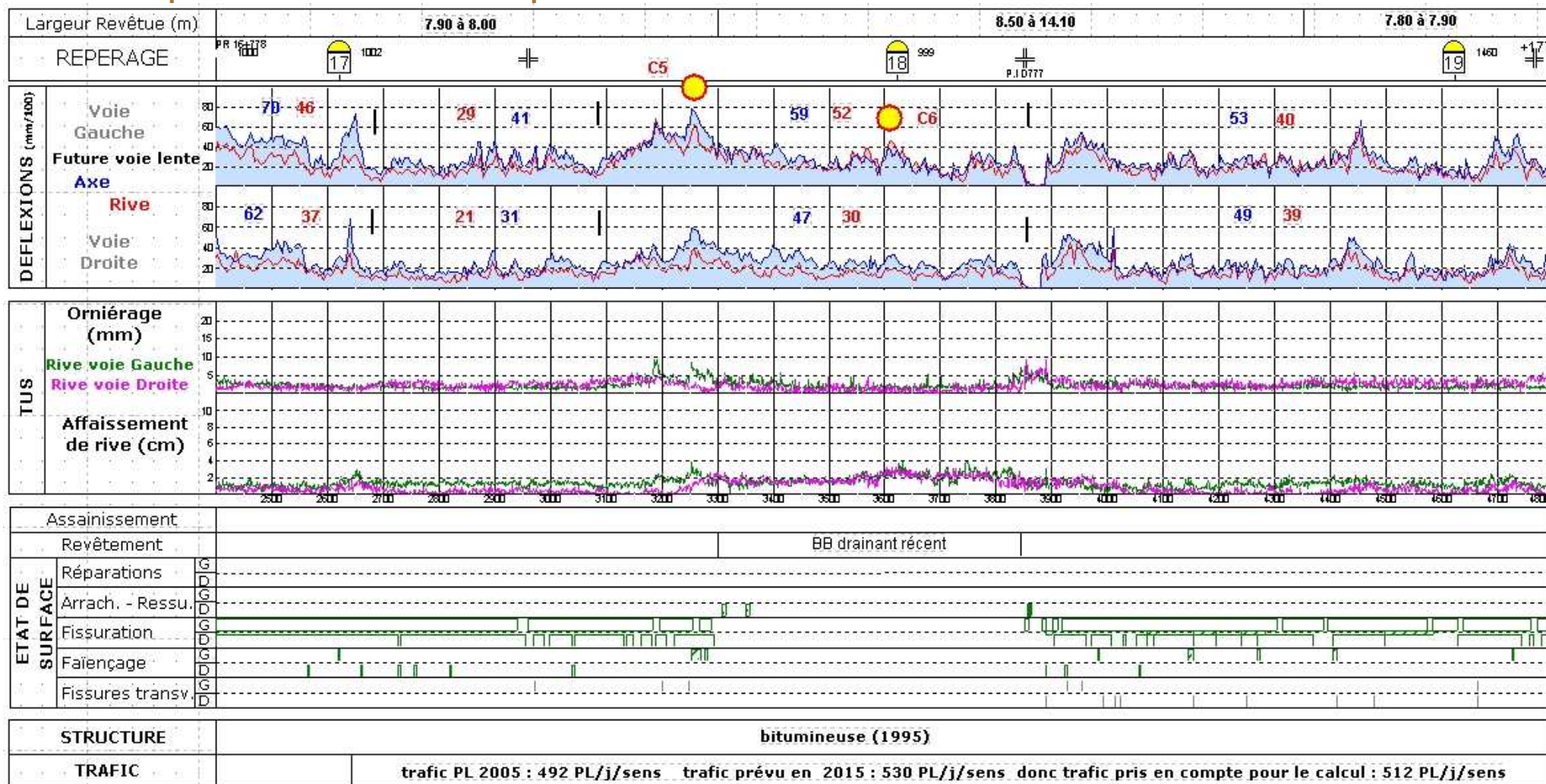
¹⁰ Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées N°102 juil-août 1979 – L'ovalisation : une nouvelle méthode de mesure des déformations élastiques des chaussées. R. Kobisch ; C. Peyronne

Méthode d'essai LPC n° 41 : Ovalisation – Exécution et exploitation des mesures

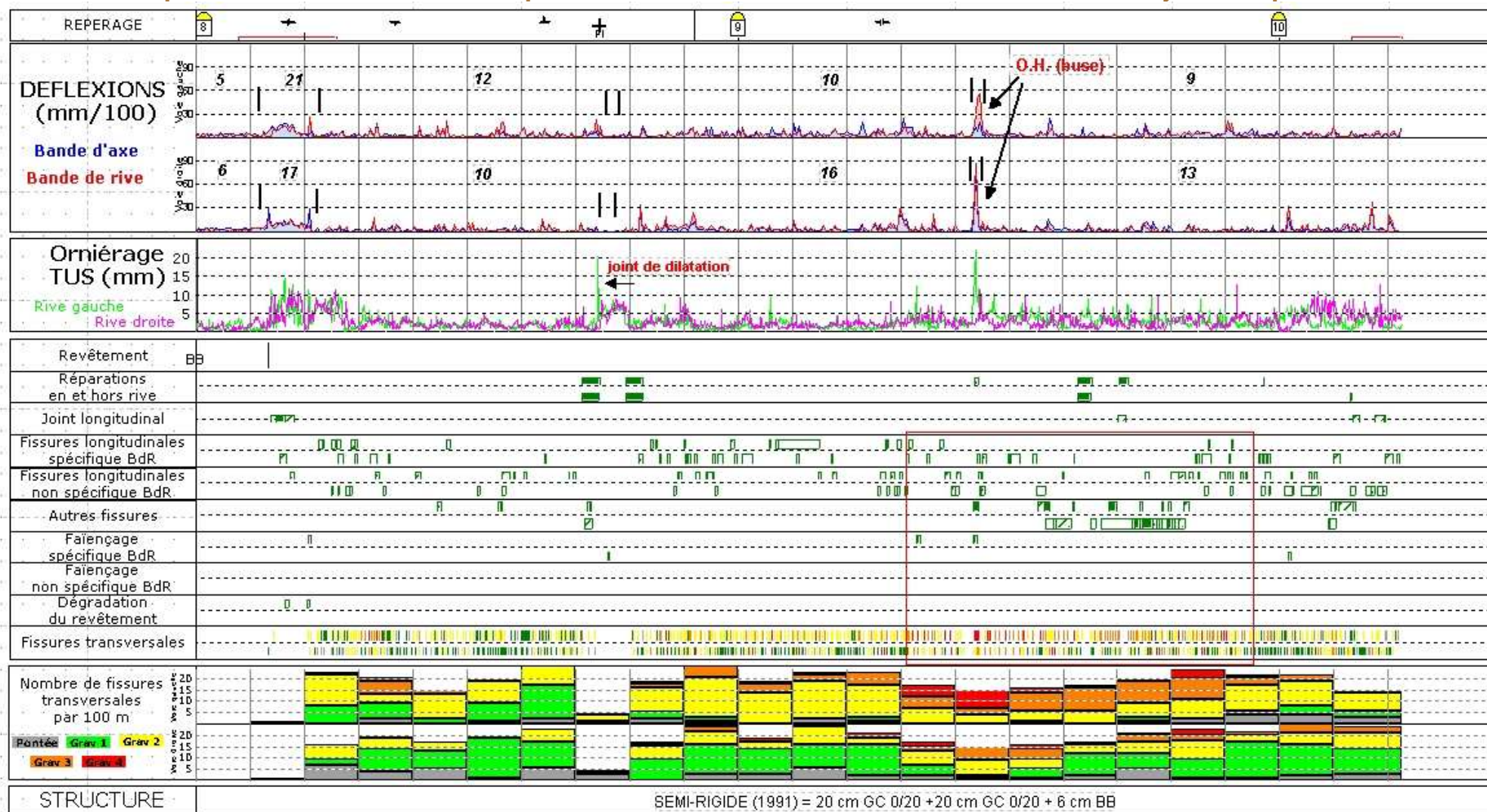
5.1 Exemple de schéma-itinéraire pour des chaussées souples



5.2 Exemple de schéma-itinéraire pour des chaussées bitumineuses



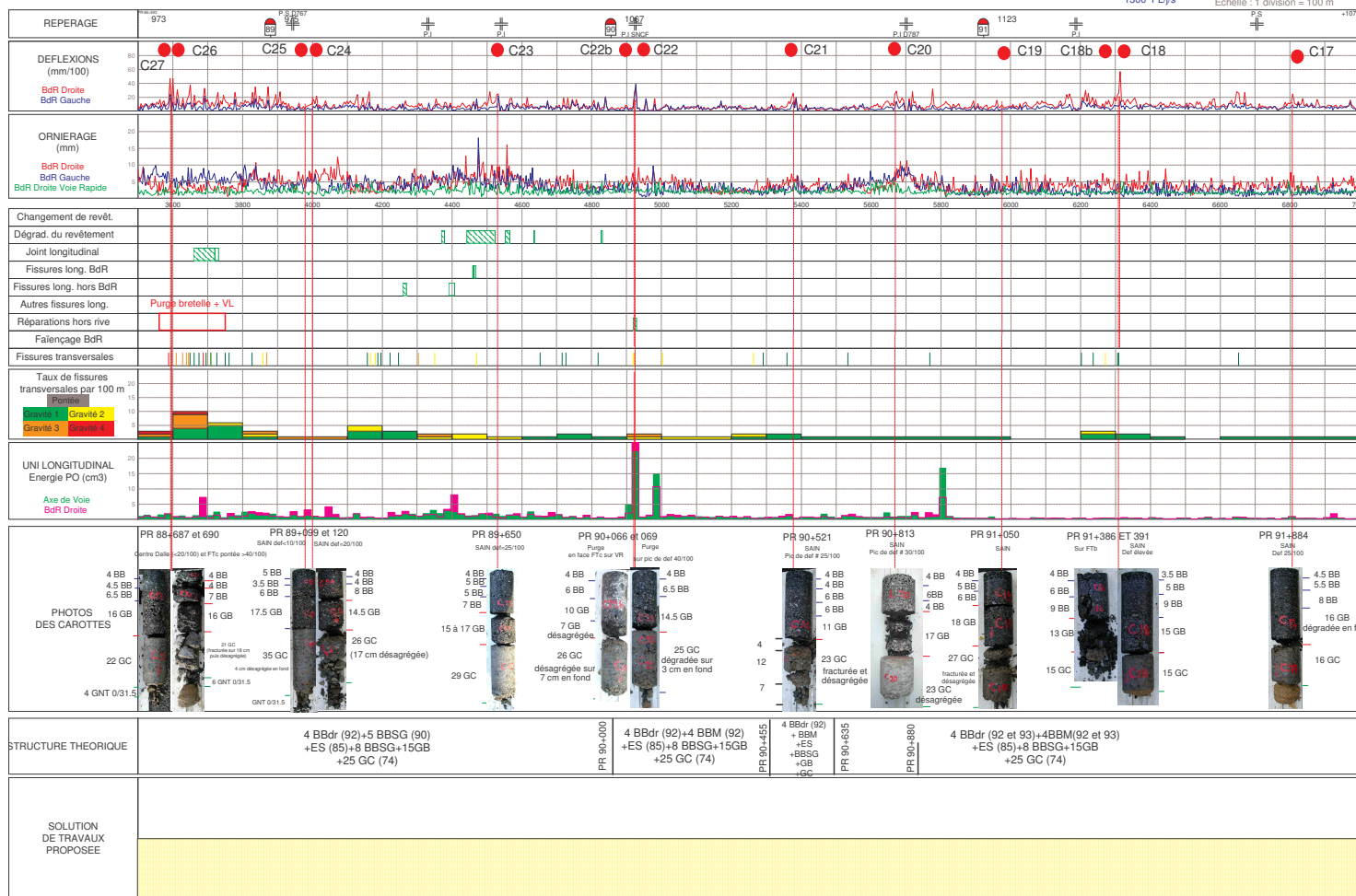
5.3 Exemple de schéma-itinéraire pour structures à assise traitée aux liants hydrauliques



5.4 Exemple de schéma-itinéraire pour structures mixtes



Traffic : 1300 PL/j/s



Chapitre 3 : Diagnostic et modélisation

1 Principes généraux de la modélisation au service du diagnostic

A ce stade de l'étude, l'itinéraire a été découpé en une ou plusieurs zones homogènes, à partir des résultats des mesures à grand rendement. Pour chacune des zones homogènes ainsi définies, des sections témoins, choisies comme représentatives, ont fait l'objet d'investigations complémentaires.

L'ensemble des données disponibles (issues des mesures à grand rendement et des investigations complémentaires) doit alors être analysé dans le but d'explicitier le comportement de chacune de ces sections témoins. Cette analyse des essais et mesures in situ se fait dans un premier temps en vérifiant la cohérence des informations disponibles, puis dans un second temps en intégrant ces éléments dans une approche calculatoire de la structure.

Cette approche globale du fonctionnement de la structure, croisant observations, mesures et calculs, permet ainsi de confirmer ou d'infirmer certains scénarii de fonctionnement et d'apparition des dégradations, et débouche sur un diagnostic de pathologie structurelle de la section témoin. Le diagnostic est d'autant plus fiable que l'ensemble des éléments disponibles (mesures, essais et calculs) convergent.

Le diagnostic établi sur la section témoin peut ensuite être étendu à l'ensemble de la zone homogène.

Le présent chapitre récapitule les principes essentiels de l'approche calculatoire des structures, puis détaille, structure par structure, la méthode d'analyse permettant de poser le diagnostic de pathologie structurelle.

2 Analyse calculatoire

2.1 Rappels sur la méthode de calcul d'une structure de chaussée

2.1.1 Méthode de dimensionnement d'une chaussée neuve

L'analyse calculatoire adoptée pour interpréter le comportement de la chaussée est celle de la démarche rationnelle utilisée aujourd'hui en France pour concevoir les chaussées neuves [XXX]. Cette démarche rationnelle suppose que la ruine de la chaussée résulte :

- pour les couches non liées : de l'orniérage par cumul de déformation permanente sous le passage répété des essieux de poids lourds ;
- pour les couches traitées : de la fissuration par fatigue sous le passage répété des essieux de poids lourds ;
- de la ruine de la couche la plus fragile (liée ou non liée).

Pratiquement, le fonctionnement mécanique de la structure est appréhendé à l'aide du modèle multicouches élastique linéaire de Burmister, qui permet de déterminer le niveau de sollicitation de chacune des couches de la structure au passage d'un essieu de référence représentatif du trafic poids lourd (l'essieu de référence français est l'essieu simple à roues jumelées de 130 kN).

A cette sollicitation calculée correspond, via une loi de fatigue du matériau déterminée en laboratoire (à force ou déplacement imposé), un nombre de passages de l'essieu de référence admissible avant rupture de la couche ; cette étape du calcul est formalisée à travers l'expression des sollicitations admissibles (voir § 2.3). Ce nombre d'essieux de référence admissible (NE) est ensuite converti à l'aide d'un coefficient d'agressivité moyen (CAM) en un nombre de passages de poids lourds (N_{PL}) traduisant la durée de vie de la couche (et par suite de la structure), à l'aide de la relation [1].

$$NE = N_{PL} \times CAM \quad [1]$$

Cette approche, conjuguant calcul de sollicitation au passage d'une charge et prise en compte de la répétition des passages des charge à travers une loi de fatigue, suppose implicitement que chaque passage d'essieux de

référence cause à la chaussée le même *dommage* (ou endommagement) *élémentaire*, jusqu'à la ruine complète de la couche (et donc de la chaussée).

Dans le cas d'une chaussée réelle soumise à des charges différentes, à des températures variables, et pour des épaisseurs de couches variant au cours de sa durée de vie (en raison d'entretiens successifs, par exemple), la conjugaison de ces niveaux de sollicitation distincts des différentes couches au cours de leur durée de vie suppose d'additionner les endommagements accumulés à chaque niveau de sollicitation à l'aide d'une *loi de cumul des dommages*.

2.1.2 Notion de dommage

La notion de dommage subi par une couche de chaussée se formalise de la façon suivante.

Concrètement, le *dommage élémentaire* causé à une couche donnée par le passage d'un essieu de référence, noté $d_{\text{élémentaire}}$ est défini par :

$$d_{\text{élémentaire}} = 1 / NE_{\text{durée de vie}} \quad [2]$$

où : $NE_{\text{durée de vie}}$: nombre équivalent de passages de l'essieu de référence conduisant à la ruine de la couche.

Le *dommage cumulé* par la couche considérée (noté $d_{\text{cumulé}}$) après ne_{subi} passages équivalents de l'essieu de référence (correspondant au trafic réel de poids lourds déjà supporté par la couche) est donc :

$$d_{\text{cumulé}} = ne_{\text{subi}} / NE_{\text{durée de vie}} \quad [3]$$

On constate que, lorsque $ne_{\text{subi}} = NE_{\text{durée de vie}}$, la couche a supporté un nombre équivalent de passages de l'essieu de référence égal à celui conduisant à sa ruine, et son dommage cumulé vaut alors 1 (ou 100%).

2.1.3 Loi de cumul des dommages

Une même couche de chaussée supporte au cours de sa durée de vie des niveaux de sollicitations divers, lui causant des dommages élémentaires distincts. Par exemple, les poids lourds qui circulent sur une chaussée sont de géométrie et de charge à l'essieu variables, et une même couche de chaussée voit son niveau de sollicitation diminuer après un rechargement sous charge constante.

L'addition de ces dommages élémentaires divers accumulés en raison de conditions de chargement variables se fait à l'aide d'une loi de cumul des dommages. On utilise couramment celle de Miner.

$$d_{\text{total cumulé}} = \sum_{i=1}^n d_{\text{cumulé}}^{(i)} = \sum_{i=1}^n \frac{ne_{\text{effectif}}^{(i)}}{NE_{\text{durée de vie}}^{(i)}} \quad [4]$$

où :

- $d_{\text{total cumulé}}$: dommage total accumulé par la couche considérée, sollicitée à différents niveaux i ;
- i : numéro correspondant à des conditions de chargement spécifiques (i varie de 1 à n).

Par analogie au comportement d'une couche sous conditions de chargement constante (voir § 2.1.2), la ruine de la couche est atteinte lorsque son dommage total cumulé vaut 1 (ou 100 %).

2.2 Application au cas d'une chaussée existante

La méthode rationnelle de calcul d'une structure de chaussée peut être utilisée dans le cas des chaussées existantes pour :

- estimer par calcul inverse le module d'une ou plusieurs couches, non mesurable ;
- vérifier le dimensionnement initial ;
- évaluer l'endommagement de chacune des couches de la structure en fonction de l'historique de la chaussée ;
- valider un scénario d'endommagement pour confirmation ou infirmation.

2.2.1 Estimation d'un module d'une couche par calcul inverse

La détermination du module de chaque couche d'une chaussée existante est nécessaire aux phases de diagnostic, pour l'aspect calculatoire.

Toutefois, cet exercice est difficile :

- on peut effectivement réaliser des essais en laboratoire sur les matériaux prélevés in situ, mais c'est coûteux et rarement réalisé (sauf cas particulier, du type expertise) ;
- lorsque le matériau traité est dégradé, la mesure ne rend compte que du matériau entre deux fissures. Or le calcul à l'aide du modèle de Burmister requiert un module « global » équivalent, fissures comprises.

On préfère donc :

- estimer le module des matériaux traités en fonction du module de référence du matériau, de son état en place (sain, fissuré, désagrégé), et éventuellement des conditions de l'essai considéré ;
- déterminer par calcul inverse le module des matériaux non traités, selon des règles pré-établies, en s'en référant notamment à la valeur de la déflexion caractéristique. Le module d'un matériau non traité est supposé constant dans le temps (sauf explication contraire).

2.2.2 Estimation des sollicitations dans la chaussée "état neuf"

Une fois les valeurs de module des différentes couches de la chaussée connues, le calcul des sollicitations dans la chaussée dans son état originel (neuf en totalité ou partiellement après travaux d'entretien) permet d'ores et déjà de confirmer certaines hypothèses, telles que la couche à l'origine des désordres dans certains cas (par exemple, un sol support manifestement trop peu porteur, ou une couche d'assise trop sollicitée car sous-dimensionnée ou décollée).

2.2.3 Évaluation de l'endommagement

La détermination des sollicitations dans la chaussée à l'état neuf permet de calculer pour chaque couche la durée de vie théorique à l'origine de cette couche $NE_{\text{durée de vie}}$ (voir § 2.3), et par suite le dommage élémentaire de chaque couche $d_{\text{élémentaire}}$. L'évaluation du trafic poids lourds effectif ayant déjà emprunté la chaussée (et par suite le trafic équivalent effectif ne_{subi}) permet alors de calculer le dommage cumulé de chaque couche.

Si ce dommage cumulé dépasse la valeur de 1 (ou de 100 %), la couche concernée peut être suspectée d'avoir atteint sa durée de vie.

Dans le cas où la chaussée actuelle résulte de travaux de rechargement successifs, le calcul d'endommagement sera conduit couche par couche pour chaque phase de fonctionnement, intégrant l'état probable de chaque couche pendant la phase (matériau neuf, ou déjà dégradé), et le dommage total cumulé sera calculé par couche en fonction de la loi de Miner.

Les conclusions seront tirées comme précédemment en fonction de la valeur du dommage total cumulé.

Dans le cas de discordance entre les dommages calculés et l'état de la chaussée, il est nécessaire de mettre en doute le trafic poids lourds réel, la qualité des matériaux et des interfaces, et les conditions climatiques supportées par la chaussée.

2.3 Expression des valeurs admissibles

La relation permettant de déterminer la durée de vie d'une couche en fonction de son niveau de sollicitation induite au passage de l'essieu de référence est l'expression de la valeur admissible, utilisée pour dimensionner une chaussée neuve, exprimée ici en fonction de la sollicitation. Cette relation est propre à chaque type de matériau (non traité, bitumineux ou traité au liant hydraulique). On en donne le détail ci-dessous.

Les valeurs des paramètres à utiliser pour les calculs sont données en annexe 4.

Pour les matériaux bitumineux, le critère de dimensionnement est la déformation horizontale à la base du matériau, ε_t :

$$NE_{\text{durée de vie}} = \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_6 \times ks \times kc \times kr} \times \sqrt{\frac{E(\theta_{\text{éq}})}{E(10^\circ\text{C})}} \right)^{\frac{1}{b}} \times 10^6 \quad [5]$$

Pour les matériaux traités aux liants hydrauliques et pour le béton de ciment le critère est la contrainte horizontale à la base de la couche, σ_t :

$$NE_{\text{durée de vie}} = \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_6 \times ks \times kc \times kd \times kr} \right)^{\frac{1}{b}} \times 10^6 \quad [6]$$

Pour les matériaux non traités, le critère est la déformation verticale à la surface de la couche, ε_z :

$$NE_{\text{durée de vie}} = \left(\frac{\varepsilon_z}{A} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad [7]$$

avec :

- $NE_{\text{durée de vie}}$: nombre d'essieux équivalents de 130 kN, correspondant à la durée de vie théorique de la chaussée (pour un risque R) ;
- α : pente de la loi d'évolution des déformations permanentes pour les sols ou les matériaux non traités ($\alpha = 0,222$) ;
- ε_6 : déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion (deux points) de l'éprouvette trapézoïdale est obtenue au bout de 10^6 cycles avec une probabilité de 50 %, à 10°C et 25 Hz ($\mu\text{déf}$) ;
- $\theta_{\text{éq}}$: température équivalente adoptée pour le calcul ($^\circ\text{C}$; 15°C en France métropolitaine) ;
- σ_6 : contrainte pour laquelle la rupture conventionnelle par traction en flexion sur éprouvette à 360j est obtenue pour 10^6 cycles (MPa) ;
- A : paramètre de la loi d'évolution des déformations permanentes pour les sols et matériaux non traités (12000 $\mu\text{déf}$ pour une chaussée à fort trafic, 16000 $\mu\text{déf}$ pour une chaussée à faible trafic) ;
- b : pente de la courbe de fatigue du matériau ;
- $E(\theta)$: module d'un matériau bitumineux à la température θ et 10 Hz (essai de flexion deux points) (MPa) ;
- kc : facteur de calage du matériau ;
- kd : facteur qui prend en compte la présence des discontinuités et l'effet du gradient de température, pour les couches rigides ;
- kr : facteur tenant compte de l'approche probabiliste de la méthode rationnelle française (intègre la dispersion sur les résultats en fatigue de laboratoire et sur les épaisseurs de mise en œuvre des matériaux). Il vaut :

$$kr = 10^{-u \times b \times \sqrt{SN^2 + (c \times Sh/b)^2}}$$
- ks : facteur tenant compte des hétérogénéités de portance de la plate-forme support ;
- SN : écart type des résultats de l'essai de fatigue ;
- Sh : écart type de la dispersion des épaisseurs de mise en œuvre des couches d'assise ;
- c : coefficient qui relie la variation des déformations ou contraintes et la dispersion sur les épaisseurs de mise en œuvre (2 m^{-1} ou $0,02 \text{ cm}^{-1}$) ;
- u : fractile de la loi de probabilité normale centrée réduite (fonction du risque R de calcul retenu) ;
- R : risque de rupture de la couche, au terme de sa durée de vie théorique (en %).

Nota : le risque retenu pour le calcul de l'endommagement dans la phase diagnostic est de 50 % ($kr = 1$)

3 Les chaussées souples traditionnelles

3.1 Pathologies des chaussées souples traditionnelles

Sur les chaussées souples, les principales dégradations qui apparaissent par fréquence décroissante sont les suivantes :

- fissuration et faïençage de fatigue ;
- déformation et orniérage à grand rayon ;
- affaissement en rive de chaussée ;
- fissuration due au vieillissement ;
- fissuration d'adaptation de la structure ;
- autres fissures ;
- arrachements de surface.

De plus, ces dégradations peuvent être recouvertes en partie ou en totalité par des réparations, qui les masquent ; ces réparations doivent donc être considérées comme des dégradations existantes, de moindre gravité.

3.2 Découpage en zones homogènes

Le découpage en zones homogènes est établi à partir :

- de la structure théorique ;
- de la déflexion (et du rayon de courbure) ;
- des dégradations (fissuration et orniérage) ;
- de l'état du drainage ;
- éventuellement, du trafic.

3.2.1 Découpage en zones homogènes à partir de la déflexion et du rayon de courbure

La valeur de la déflexion mesurée sur une chaussée souple dépend de l'épaisseur et de l'état résiduel des couches bitumineuses, de la rigidité des couches d'assises non traitées (épaisseur et catégorie de la GNT) et de la qualité de la plate forme support (couche de forme comprise, généralement en matériau non traité). Par suite, sa valeur caractéristique constitue un indicateur du comportement mécanique de l'ensemble structure/support de chaussée.

Le tableau 9 précise la classe de déflexion à retenir en fonction de la valeur caractéristique issue des mesures par 200 m. Il fournit un qualificatif du comportement global de la chaussée en fonction de la classe de trafic.

Classes	≤ D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 44	de 45 à 74	de 75 à 99	de 100 à 149	de 150 à 199	de 200 à 299	≥ 300
Niveau global de comportement en fonction de la classe de trafic							
T1 – T0	Bon	Moyen	Mauvais				
T3 – T2	Bon		Moyen		Mauvais		

Tableau 9 - Classes de déflexion caractéristique pour les chaussées souples

Le rayon de courbure est pour sa part plus sensible aux caractéristiques des couches de surface qu'à celles des couches profondes. Sur chaussée souple, cette mesure est particulièrement significative lorsque la déflexion est inférieure à 100/100^{ème} mm ; sa valeur médiane permet alors une approche plus discriminante des désordres de

la chaussée, intégrant d'emblée la déformabilité à laquelle seront soumis les rechargements futurs. Le tableau 10 fournit la valeur médiane minimale de rayon de courbure correspondant à une structure « saine ». Lorsque la valeur médiane du rayon de courbure est inférieure, elle traduit : soit une insuffisance des caractéristiques des couches bitumineuses, soit un décollement d'interface en partie supérieure de la structure, soit une couche de base en grave non traitée de mauvaise qualité. La modélisation devra en tenir compte.

Déflexion (1/100 mm)	Épaisseur de matériau bitumineux (m)		
	≤ 0,05 m	> 0,05 m ≤ 0,10 m	> 0,10 m
≤ D3 (0- 44/100 mm)	125	160	210
D4 (45-74/100 mm)	85	120	165
D5 (75-99/100 mm)	65	100	145
D6 (100-149/100 mm)	45	75	115
D7 (150-199/100 mm)	35	60	100
D8 (200-299/100 mm)	25	50	85

Tableau 10 – Valeur médiane minimale de rayon de courbure en mètres en fonction de l'épaisseur de matériaux bitumineux et de la classe de déflexion

3.2.2 Découpage en zones homogènes en dégradations

Le découpage de l'itinéraire en zones homogènes en dégradations se fait en fonction du type et de la gravité de la fissuration et du faïençage (et de sa position), ainsi que du niveau de déformation permanente du profil en travers (orniérage à grand rayon et affaissement de rive).

Le tableau 11 précise la classe de fissuration/faïençage à retenir en fonction de la longueur cumulée affectée (exprimée en pour cent) issue du relevé.

Dans le cas de l'application du mode opératoire M2 dans les bandes de roulement les fissurations longitudinales ainsi que le faïençage sont classés en grave.

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

Tableau 11 - Classement en zones homogènes en fonction du % de zones fissurées et faïencées pour les chaussées souples

Si les réparations affectent plus de 10 % du linéaire, le critère fissuration/faïençage est majoré d'une classe (à l'exception de la classe F1 reclassée en F3).

Si les réparations affectent plus de 30 % du linéaire, la majoration est de deux classes (à l'exception de la classe F1 reclassée en F4).

Nota : Les dégradations localisées aux bandes de roulement priment pour les niveaux F3 à F5 (présomption de fatigue de la structure) . Les niveaux F1 et F2 correspondent aux fissures non spécifiques aux bandes de roulement (présomption de vieillissement des matériaux de couche de surface).

Le tableau 12 précise la classe d'orniérage (orniérage à grand rayon et/ou affaissement de rive) à retenir en fonction de la valeur maximale issue de la mesure.

Classes d'orniérage		Déformation en mm		
		< 10	10 à 20	> 20
Extension en %	≤ 10 %	O1	O2	O4
	> 10 %		O3	

Classes de l'affaissement		Affaissement en mm		
		< 30	30 à 60	> 60
Extension en %	≤ 10 %	A1	A2	A4
	> 10 %		A3	

Tableau12 - Classements de l'orniérage dans les bandes de roulement et des affaissements de rive

3.2.3 Agrégation des zones homogènes en dégradations, en déflexion et en déformations permanentes

La synthèse des zones homogènes en déflexions, dégradations et ornières conduit à un découpage fin, qu'il convient d'agréger en zones individuelles de taille suffisante (longueur minimale 100 m) pour disposer d'un nombre raisonnable de zones homogènes décrivant l'itinéraire.

Lors de l'agrégation, le niveau de déflexion/fissuration/orniérage retenu correspondra à la valeur maximale rencontrée sur la zone homogène.

3.3 Définition des sections témoins

Des sections témoins sont alors définies pour y réaliser des essais complémentaires, essentiellement des carottages et des sondages, qui doivent permettre de comprendre les origines des dégradations constatées.

Les contraintes de sécurité et d'exploitation de la route sont prioritaires dans le choix de l'implantation de ces sections.

Remarque : une section témoin peut être l'ensemble de la section étudiée.

3.3.1 Implantation des carottages et des sondages

L'implantation des carottages est définie en fonction du niveau de dégradation relevé et de sa localisation (tableau 13). Il s'agit pour l'essentiel de différencier les fissures dues au vieillissement de l'enrobé (ou fissuration thermique) venant de la surface, de celles générées par un défaut d'interface ou de structure venant de la base des couches (ou fissuration de fatigue).

Classe de fissuration/faiénçage		F1	F2	F3	F4	F5
Nombre de carottes	Sur zone saine	3	2	3	2	2
	Sur faiénçage, FL ou FT dans les bandes de roulement	1	1	3	4	4
	Sur faiénçage, FL ou FT hors bandes de roulement	2	3	-	-	-
	Total	6	6	6	6	6

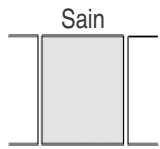
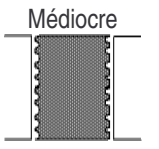
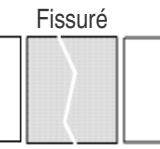

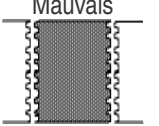
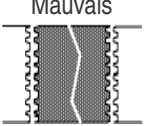
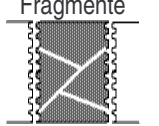
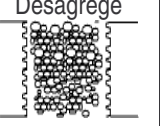
Tableau 13 - Implantation des carottages

Des sondages seront également réalisés, de la façon suivante :

- au moins un sondage par 1000 m pour connaître la structure et le sol en place, en zone peu dégradée ;
- un sondage sur zone déformée (ornière) ou affaissée, partant du milieu de la voie jusqu'à la rive (voir annexe 2).

3.3.2 Classification des matériaux prélevés sur carottes et lors des sondages

En ce qui concerne les *carottes*, la classification des matériaux constitutifs se fait pour chaque couche bitumineuse en tenant compte des deux éléments suivants : aspect de la carotte et qualité des parois de la cavité. La tenue de la carotte informe directement sur l'état des interfaces.

		Classification des matériaux des sous couches				
		Qualité de la carotte				
		<i>Saine</i>	<i>Médiocre</i>	<i>Fissurée</i>	<i>Fragmentée</i>	<i>Désagrégée</i>
Qualité de la paroi	<i>Lisse</i>					Non rencontré
	<i>Granulats arrachés</i>	Non rencontré				
		Classification de la qualité des interfaces				
Collée		Bon accrochage, bonne liaison				
Semi collée		Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison				
Décollée		Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface				

La coupe caractéristique des carottages pour une section témoin prendra en compte :

- l'épaisseur moyenne des couches (en éliminant les surépaisseurs importantes) ;
- la qualité des matériaux en retenant le cas suivant immédiatement le cas le plus défavorable que l'on élimine sauf s'il apparaît plus d'une fois ;
- la qualité des interfaces en retenant le cas suivant immédiatement le cas le plus défavorable que l'on élimine sauf s'il apparaît plus d'une fois.

En ce qui concerne les *sondages*, la classification des couches liées se fait conformément aux états décrits ci-avant, dans la mesure du possible. En ce qui concerne les matériaux des couches non liés, on décrira les critères suivants : qualité (propreté) et état hydrique des matériaux, limite des couches, arrivées d'eau éventuelles.

La coupe caractéristique des sondages pour une section témoin prendra en compte :

- l'épaisseur des couches et leur géométrie (affaissement localisé, tassement, orniéage) ;
- la qualité des matériaux ;
- la qualité des interfaces si possible.

3.4 Modélisation des sections témoins

Pour chaque zone homogène et en fonction des données de la section témoin, une synthèse des informations collectées est établie ainsi qu'une modélisation de la structure, dans le but de valider par le calcul les mécanismes ayant conduit aux dégradations observées.

3.4.1 Détermination du module du sol par calcul inverse

Les épaisseurs prises en compte sont celles issues des carottages et sondages. Toutes les interfaces sont supposées collées sauf celles avérées décollées entre couches bitumineuses lors des carottages.

Les couches de graves non traitées sont découpées en sous-couches d'au plus 0,1 m d'épaisseur, exemple : une couche de 0,25 m se décompose en partant du bas en sous couches de 0,10 m, 0,10 m et 0,05 m.

Le sol, d'épaisseur fixée conventionnellement à 6 m, repose sur un massif semi-infini indéformable ($E \geq 10000$ MPa, $\nu = 0,25$), de façon à rendre compte de l'effet de la non linéarité du sol.

Les modules des matériaux bitumineux sont plus sensibles à la fréquence de la mesure qu'au taux de dégradations. Par suite, pour le calcul inverse du module du sol on adopte une valeur de module du matériau bitumineux égale à sa valeur de référence divisée par 2, en raison de la vitesse faible de mesure de la déformée, indépendamment du taux de fissuration à l'exception des matériaux fragmentés ou désagrégés dont les modules sont indiqués dans le tableau 15.

Les modules des matériaux non liés sont estimés à partir des valeurs de déflexion caractéristiques, en considérant que le module des matériaux granulaires des couches d'assises est proportionnel à celui de la couche sous-jacente : ce rapport k est fixé à 2. De plus, le module des matériaux granulaires (tableau 14) ne peut dépasser une valeur maximale fonction de la propreté¹¹ et de l'humidité constatées du matériau en place.

Humidité	Propreté		
	propre	pollué (1)	très pollué (2)
Sec (3)	600	400	400
Humide	400	400	200
Suintant (4)	400	200	200

(1) pourcentage de fines (passant à $63 \mu\text{m}$) > 12 et $MB_{0,D} < 0,8$

(2) pourcentage de fines (passant à $63 \mu\text{m}$) > 12 et $MB_{0,D} \geq 0,8$

(3) teneur en eau $\leq 3 \%$

(4) arrivée d'eau libre dans le trou de sondage

Tableau 14– Module maximal des matériaux granulaires des couches d'assises pour les chaussées souples (MPa)

Le module du sol est déterminé par calcul inverse à partir de la valeur de la déflexion caractéristique de la section témoin.

3.4.2 Détermination du module des couches bitumineuses

A partir de la valeur médiane du rayon de courbure (et indépendamment de la valeur de la déflexion), la valeur du module du sol ayant été déterminée par calcul inverse (et conséquemment celle des couches granulaires sus-jacentes), on détermine le module des couches bitumineuses, à la température de mesure et pour une fréquence estimée de 1 Hz (dans le cas des deflectographe), avec les conditions d'interface issues des carottages.

Ces valeurs de module sont ensuite ramenées à 15°C et 10 Hz (cf. annexe 4).

En l'absence de mesure du rayon de courbure, le module des matériaux bitumineux sera fonction du taux de dégradations de la section témoin, de l'état des matériaux carottés et dans le cas de couches décollées du taux d'endommagement (tableau 15). L'état des matériaux carottés doit être corrélé avec l'état de dégradations de la section.

Classe de fissuration/faïençage		F1	F2	F3	F4	F5
Couche de roulement		E_{nominal}	3000		2000	
Autres couches bitumineuses	sain /fissuré			2000		
	fragmenté			1000		
	désagrégé			500		

Tableau 15- Module forfaitaire des enrobés bitumineux selon leur état de dégradation

¹¹ Norme XP P18-545 § 5.7, page 18, Qualification des fines des graves

Nota : on attribue aux couches d'enduits superficiels un module de référence forfaitaire de 1000 MPa

3.5 Calcul de l'endommagement

Le calcul d'endommagement peut se faire à partir de l'historique de la chaussée, en termes de dates et de natures des travaux, et du trafic supporté par la chaussée.

Cette approche calculatoire permet de confirmer un type de dégradation, ou d'en expliquer l'apparition précoce.

3.5.1 Endommagement des couches non traitées

Dans le cas des chaussées souples, la cause majeure et généralement première de la dégradation est la déformation permanente du sol support (ou de la couche granulaire la plus déformable), soumis aux efforts générés par le passage des essieux de poids lourds.

Le sol support en place ne peut en fait supporter qu'un nombre limité de passages de poids lourds, nombre au-delà duquel sa déformation permanente devient trop importante et provoque la ruine de la chaussée. On considère par convention qu'un entretien de la chaussée efface cette déformation permanente des couches non liées et les ramènent à leur état initial (endommagement nul). En conséquence, les déformations permanentes ne sont cumulées qu'entre deux séquences de travaux.

Pour chacune des phases de fonctionnement de la chaussée, le nombre d'essieux de référence admissible par le sol support est noté $NE_{phase\ i}$. Il est obtenu en calculant la déformation verticale $\epsilon_{z, phase\ i}$ en surface du sol support, générée au passage de l'essieu de référence de 130 kN, puis en utilisant la relation (8).

$$NE_{phase\ i} = (\epsilon_{z, phase\ i} / 16000)^{-1/0.2222} \quad (8)$$

Le nombre de poids lourds empruntant la chaussée pendant cette phase i est noté $n_{phase\ i}$. Il est converti en un nombre équivalent de passages de l'essieu de référence, en le multipliant par le coefficient d'agressivité moyen du poids lourd (pour les couches non traitées).

Le coefficient d'agressivité moyen du poids lourd CAM dépend du trafic considéré (cf. § 2.2).

L'endommagement de la structure pendant la phase i , noté $d_{phase\ i}$, est alors calculé comme suit :

$$d_{phase\ i} = n_{phase\ i} \times CAM / NE_{phase\ i}$$

Cette démarche de calcul de l'endommagement du sol support vaut également pour toute autre couche de matériau non traité ; bien que cela soit habituellement le cas, la couche de sol n'est pas nécessairement la couche la plus endommagée.

3.5.2 Endommagement des matériaux enrobés

Il est également utile d'évaluer l'endommagement des couches bitumineuses. Celles-ci ne sont généralement pas à l'origine de la ruine de la chaussée, mais cela peut arriver lorsque leur épaisseur devient « importante » (entre 7 et 12 cm).

Pour chacune des phases de fonctionnement de la chaussée, le nombre d'essieux de référence admissible par la couche bitumineuse est noté $NE_{phase\ i}$. Il est obtenu en calculant la déformation en extension $\epsilon_{t, phase\ i}$ à la base de la couche bitumineuse, générée au passage de l'essieu de référence de 130 kN, puis en utilisant la relation explicitée en ch3 § 2.3 (9).

$$NE_{phase\ i} = \left(\frac{\epsilon_{t, phase\ i}}{\epsilon_6 \times ks \times kc \times kr} \times \sqrt{\frac{E(\theta_{eq})}{E(10^\circ C)}} \right)^{\frac{1}{b}} \times 10^6 \quad (9)$$

Le nombre de poids lourds empruntant la chaussée pendant cette phase i est noté $n_{phase\ i}$. Il est converti en un nombre équivalent de passages de l'essieu de référence, en le multipliant par le coefficient d'agressivité moyen du poids lourds (pour les couches bitumineuses).

Nota :

Lorsque l'épaisseur de la couche bitumineuse de surface diminue, la sollicitation ϵ_t calculée à la base de cette couche bitumineuse augmente, puis décroît, décrivant ainsi une courbe dite « en cloche » (figure 13). On veillera à s'assurer que le fonctionnement de la structure étudiée se situe bien du côté droit de la courbe en cloche (la sollicitation diminue quand l'épaisseur augmente). Si ce n'est pas le cas (c'est à dire si l'on est sur la partie gauche de la courbe en cloche), on retiendra alors pour la suite des calculs la sollicitation ϵ_t correspondant au sommet de la courbe (sur l'exemple, la valeur de 335 $\mu\text{déf}$).

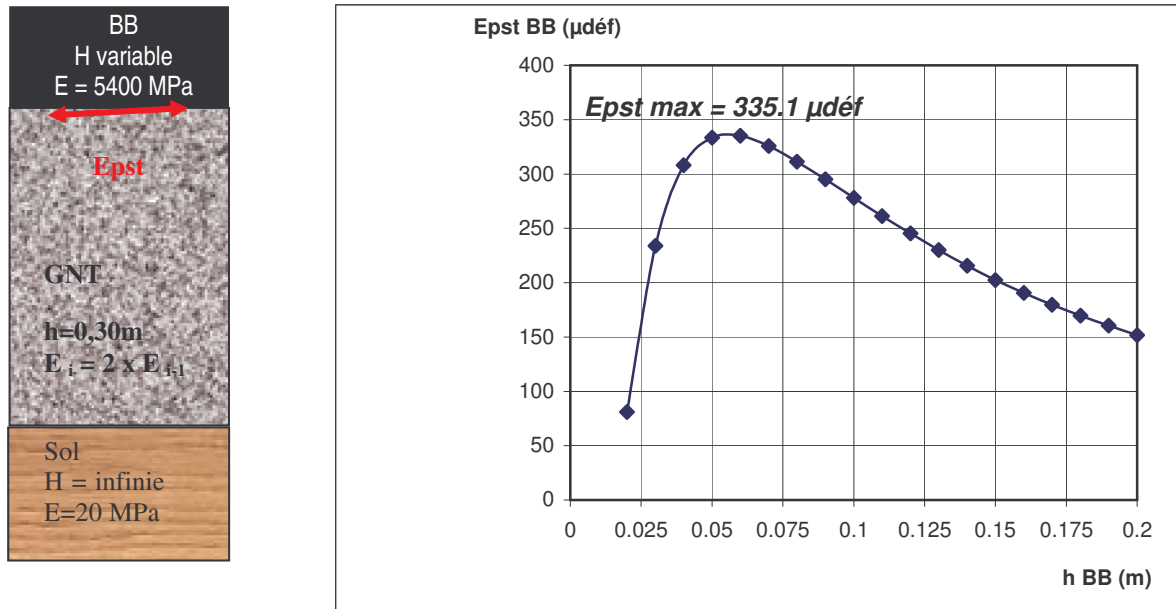


Figure 13 - Évolution de la déformation en extension à la base de la couche de surface bitumineuse, dans le cas d'une chaussée souple (courbe dite « en cloche »)

Le calcul d'endommagement peut se faire à partir de l'historique de la chaussée, en termes de dates et de natures des travaux, et du trafic supporté par la chaussée.

Cette approche calculatoire permet de confirmer un type de dégradation ou d'en expliquer l'apparition précoce.

3.6 Cohérence entre le diagnostic et l'endommagement calculé

La cohérence entre l'endommagement calculé (lorsque ce calcul est possible) et les dégradations observées doit être vérifiée.

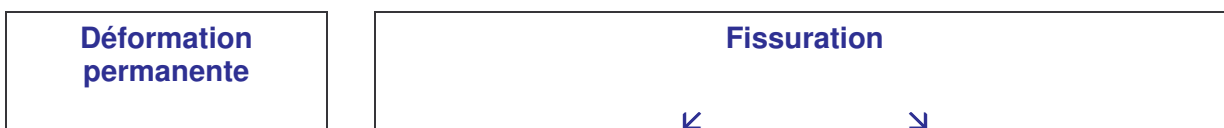
Une chaussée est considérée comme peu dégradée si son endommagement est inférieur à 1. Elle peut être considérée comme fortement endommagée si son endommagement calculé est compris entre 1 et 10.

En cas de désaccord, la modélisation de la structure pourra être adaptée en ajustant le module du sol support et les conditions d'interface, en veillant à conserver un modèle de chaussée réaliste.

3.7 Synthèse du diagnostic

Les structures souples présentent des pathologies pouvant être classées en différents cas types.

Le classement de ces différents cas possibles s'effectue en fonction des types de fissuration et de déformation permanente, ainsi que de l'importance de la déformation permanente, selon le schéma suivant.



↙ Fluage de la CdRout ↓ Etude	↘ Autre O1 O2 O3	Cas usuels			Cas particuliers		
		Aucune	F1/F2	F3 à F5	Joint longitu.	Fiss. de rive	Fiss. adap- tation
		-	Pb thermique	Pb de fatigue	Colmater	Etude struc.	Etude géotech
		Vérifier fatigue			Vérifier fatigue		
		Pb immédiat de sécurité			Pb immédiat de sécurité		

Schéma de principe permettant une pré-identification rapide de l'origine probable des désordres

Nota :

A titre informatif, l'expérience montre que la chaussée n'a pas de défaut structurel majeur tant que la déflexion caractéristique ne dépasse pas la valeur indiquée dans le tableau 16. Les causes des dégradations observées doivent être recherchées au niveau des matériaux et/ou des interfaces.

Classe de trafic	T5	T4	T3	T2
D caractéristique (1/100 mm)	155	130	105	85

Tableau 16 - Valeur caractéristique de la déflexion pour une chaussée souple convenablement dimensionnée

3.8 Exemple 1 de modélisation et de diagnostic d'une zone homogène de chaussée souple

3.8.1 Données

3.8.1.1 Structure théorique

Non connue.

On sait seulement que la couche de surface a 12 ans d'âge, la précédente 25 ans et l'initiale au moins 35 ans.

3.8.1.2 Environnement

Route à 2 voies, largeur 6 m ;
Accotement : largeur 1 m à 1,5 m, enherbé ;
Fossé : profondeur 50 cm, en bon état ;
Profil en travers : terrain naturel.

3.8.1.3 Trafic

MJA 2006 : 145 PL/J/sens (trafic T3) ; taux de progression annuel : 2 % géométrique ;

Trafic à la mise en service : $145 / (1,02^{35}) = 73 \text{ PL} / \text{j/voie}$;

CAM = 0,75 pour le sol et 0,5 pour les couches bitumineuses ;

Nombre cumulé de poids lourds en 2006 depuis 35 ans :

$$N_{PL} = 365 \times 73 \times \left[(1 + 0,02)^{35} - 1 \right] / 0,02 = 1,33 \cdot 10^6 \text{ PL}$$

3.8.1.4 Année de l'étude : 2006

3.8.1.5 Déflexion caractéristique mesurée avec un déflectographe 03

$d_c = 120/100^{\text{ème}}$ mm (rayon non mesuré).

Classes	≤ D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 44	de 45 à 74	de 75 à 99	de 100 à 149	de 150 à 199	de 200 à 299	≥ 300

3.8.1.6 Dégradations

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

Classes d'orniérage		Déformation en mm		
		< 10	10 à 20	> 20
Extension en %	≤ 10 %	O1	O2	O4
	> 10 %		O3	
Classes de l'affaissement		Affaissement en mm		
		< 30	30 à 60	> 60
Extension en %	≤ 10 %	A1	A2	A4
	> 10 %		A3	

3.8.1.7 Carottages

Résultats de carottage												
	Zone saine			Zone saine			Zone fissurée/faïencée dans bandes de roulement					
	Carottage 1			Carottage 2			Carottage 3			Carottage 4		
	ép.	état	Interf	ép.	état	Interf	ép.	état	Interf	ép.	état	Interf
BB 1	0,05	S	C	0,04	S	C	0,04	Fis	C	0,035	Fis	C
BB 2	0,06	S	C	0,055	S	C	0,05	Fis	C	0,06	Fis	C
ESU (2 à 3 couches)	0,02	Fis	C	0,015	Fis	C	0,01	Fis	C	0,02	S	C

Résultats de carottage												
	Zone fissurée/faïencée dans bandes de roulement											
	Carottage 5			Carottage 6								
	ép.	état	Interf	ép.	état	Interf						
BB 1	0,045	Frag	C	0,03	Fis	C						
BB 2	0,075	Frag	C	0,05	Fis	C						
ESU (2 à 3 couches)	0,025	Fis	C	0,015	S	C						

État des matériaux : S : sain ; Fis : fissuré ; Frag : fragmenté , Dés : désagrégé
Qualité de l'interface : C : collée ; SC : semi collée ; D : décollée

3.8.1.8 Sondages

Le sondage réalisé met en évidence, outre les couches d'enrobés décrites par les carottages, une couche de matériau non traité d'environ 0,40 m, propre mais humide.

3.8.2 Modélisation de la chaussée en place

3.8.2.1 Calcul n°1 : estimation du module du sol

Dans un premier temps, le module des enrobés bitumineux est pris égal au module de référence divisé par 2. La seule inconnue du problème est le module du sol support. Les données nécessaires à l'estimation par calcul inverse du module du sol support sont les suivantes

Nature	Épaisseurs (cm)	Qualité des matériaux	Interfaces	Module (MPa)
BB 1	0,04	Fissuré	Collée	2700
BB 2	0,06	Fissuré	Collée	2700
ES	0,02	Fissuré	Collée	500
GNT 4	0,10	Propre et humide	Collée	2 x E _{GNT3} ⁽¹⁾
GNT 3	0,10	Propre et humide	Collée	2 x E _{GNT2} ⁽¹⁾
GNT 2	0,10	Propre et humide	Collée	2 x E _{GNT1} ⁽¹⁾
GNT 1	0,10	Propre et humide	Collée	2 x E _{sol} ⁽¹⁾
Sol en place	6,00	-	Collée	27 ⁽²⁾
Substratum	Infini	-	-	10000

(1) Le module d'une GNT humide ne peut dépasser 400 MPa.

(2) Estimé par calcul inverse

3.8.2.2 Calcul n°2 : estimation du module des couches bitumineuses

En l'absence de données type rayon de courbure mesuré, on adopte les valeurs forfaitaires de module pour les couches bitumineuses. Les données nécessaires à l'estimation du module des couches bitumineuses sont :

Nature	Épaisseurs (cm)	Qualité des matériaux	Interfaces	Module (MPa)
BB 1	0,04	Fissuré	Collée	2000
BB 2	0,06	Fissuré	Collée	2000
ES	0,02	Fissuré	Collée	1000
GNT 4	0,10	Propre et humide	Collée	400 ⁽¹⁾
GNT 3	0,10	Propre et humide	Collée	216
GNT 2	0,10	Propre et humide	Collée	108
GNT 1	0,10	Propre et humide	Collée	54
Sol en place	6,00	-	Collée	27 ⁽²⁾
Substratum	Infini	-	-	10000

(1) Le module d'une GNT humide ne peut dépasser 400 MPa ;

(2) Estimé par calcul inverse

3.8.3 Calcul d'endommagement

3.8.3.1 Hypothèses

La chaussée a fonctionné en trois phases successives :

Phase 1 : un enduit superficiel sur la GNT (durée estimée : 10 ans) ;

Phase 2 : 6 cm de BB sur l'ancienne chaussée (durée estimée : 13 ans) ;

Phase 3 : 4 cm de BB sur l'ancienne chaussée (durée connue : 12 ans).

Le trafic est supposé avoir cru de 2% (géométrique) par an depuis 35 ans. Par suite :

T (-35 ans) : 73 PL/j/sens ;

T (-25 ans) : 88 PL/j/sens ;

T (-12 ans) : 114 PL/j/sens.

3.8.3.2 Calcul de l'endommagement

Le calcul de l'endommagement peut se faire en trois phases successives, en fonction des travaux d'entretien réalisés ; les phases 1 et 2 ont alors une valeur informative pour valider les hypothèses retenues. On ne retient dans l'analyse mécanique de la chaussée en place que le seul endommagement de la dernière phase.

Pour chaque phase, la dernière couche de roulement est supposée à l'état neuf, et la (les) couche(s) anciennes dégradées ($E = 1000$ MPa). Le module du sol support et celui de la GNT résultent des étapes de calage préliminaires. Les données mécaniques adoptées pour le calcul d'endommagement sont les suivantes :

Matériaux	Phase 1		Phase 2		Phase 3	
	H (m)	E (MPa)	H (m)	E (MPa)	H (m)	E (MPa)
BB 1	-	-	-	-	0,04	5400
BB 2	-	-	0,06	5400	0,06	1000
ES	0,02	1000	0,02	1000	0,02	1000
GNT	0,10	400	0,10	400	0,10	400
GNT	0,10	216	0,10	216	0,10	216
GNT	0,10	108	0,10	108	0,10	108
GNT	0,10	54	0,10	54	0,10	54
Sol	6,00	27	6,00	27	6,00	27
Substrat	infini	10000	infini	10000	infini	10000

Les valeurs de déformation calculées et le calcul de l'endommagement est résumé ci-après.

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
déflexion calculée (1/100 mm)	171	129	115
NPL	73	88	114
Durée	10	13	12
Taux (%)	2	2	2
N réel cumulé	291 755	471 532	558 077
Couche de surface			
Eps t (μ déf)	(1)	225,7 (2)	148,6 (3)
Obtenue pour h_{BB} (m)	-	0,075	0,095
NE _{adm}	-	428 656	3 464 755
NPL (CAM = 0, 5)	-	857 312	6 929 510
D élémentaire BB	-	0,55	0,08
Sol support			
Eps z (μ déf)	1 985	1 226	1 022
NE _{adm}	12 098	106 013	240 654
NPL (CAM = 0,75)	16 130	141 350	320 871
D élémentaire SOL	18,09	3,34	1,74

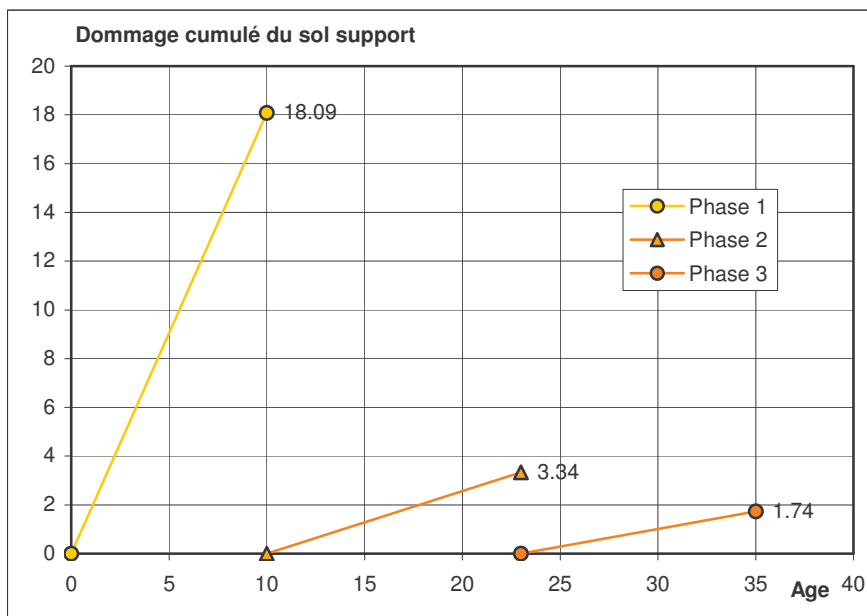
(1) Le calcul de la déformation Eps t à la base des ESU est inadaptée.

(2) La déformation Eps t à la base de la première couche de béton bitumineux est de 219,6 μ déf pour $h=0,06$ m. Étant

sur la partie gauche de la courbe en cloche, on recherche la valeur maximale de déformation qui vaut 225,7 $\mu\text{d}\acute{e}\text{f}$, obtenue pour une épaisseur de BB de 0,075 m.

(3) La déformation Eps_t à la base de la deuxième couche de béton bitumineux est de 59,4 $\mu\text{d}\acute{e}\text{f}$ pour $h=0,04$ m. Étant sur la partie gauche de la courbe en cloche, on recherche la valeur maximale de déformation qui vaut 148,6 $\mu\text{d}\acute{e}\text{f}$, obtenue pour une épaisseur de BB de 0,095m.

Nota : les calculs de $NE_{adm}(BB)$ ont été faits avec $\varepsilon_6 = 150 \mu\text{d}\acute{e}\text{f}$; $-1/b = 5$; $kc=1,1$; $kr=1$ ($R=50\%$) ; $ks=1$



3.8.4 Analyse et commentaires

On constate que :

- l'endommagement des couches bitumineuses n'atteint jamais 1. Par suite, la ruine de la chaussée ne peut leur être attribuée ;
- l'endommagement cumulé de la couche de sol dépasse largement 1. La ruine de la chaussée a donc été provoquée par une déformation permanente excessive du sol support ;
- lors des phases 1 et 2 de fonctionnement, le sol support a été fortement sollicité. Les rechargements successifs ont conduit la structure à travailler de moins en moins, sans toutefois atteindre un niveau structurel suffisant, le trafic ne cessant de croître ;
- l'endommagement accumulé par la structure lors de la dernière phase est légèrement supérieur à 1. La structure en place a aujourd'hui dépassé sa durée de vie de calcul, ce qui semble cohérent avec le niveau de dégradation relevé, et nécessite effectivement un renforcement structurel adapté.

3.9 Exemple 2 de modélisation et de diagnostic d'une zone homogène de chaussée souple

3.9.1 Données

3.9.1.1 Structure théorique

Non connue. La couche de surface a au moins 20 ans.

3.9.1.2 Environnement

Route à 2 voies, largeur 5 m ;

Accotement : largeur 1 m à 1,5 m, enherbé ;

Fossé : profondeur 30 à 40 cm, état variable (présence de plantes aquaphiles, tels des joncs);
 Profil en travers : terrain naturel, sans pente.

3.9.1.3 Trafic

MJA 2006 : 46 PL/J/sens ;

Taux de progression annuel : 2 % géométrique ;

Trafic (-20 ans) : $46/1,02^{20} = 31 \text{ PL} / \text{j} / \text{sens}$;

CAM = 0,5 pour le sol et 0,5 pour les couches bitumineuses ;

Superposition du trafic : prendre en compte le trafic 2 sens (largeur de chaussée: 5m);

Nombre cumulé de PL en 2006 : $N_{PL} = 365 \times 2 \times 31 \times [(1 + 0,02)^{20} - 1] / 0,02 = 0,55 \cdot 10^6$

Année de l'étude : 2006

3.9.1.4 Déflexion caractéristique mesurée avec un déflectographe 03

$d_c = 170/100^{\text{ème}}$ mm (rayon non mesuré)

Classes	≤ D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 44	de 45 à 74	de 75 à 99	de 100 à 149	de 150 à 199	de 200 à 299	≥ 300

3.9.1.5 Dégradations

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Fai)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Fai)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

Classes d'orniérage		Déformation en mm		
		< 10	10 à 20	> 20
Extension en %	≤ 10 %	O1	O2	O4
	> 10 %		O3	
Classes de l'affaissement		Affaissement en mm		
		< 30	30 à 60	> 60
Extension en %	≤ 10 %	A1	A2	A4
	> 10 %		A3	

3.9.1.6 Carottages

Résultats de carottage									
	Zone saine								
	Carottage 1			Carottage 2			Carottage 3		
	Ep. (m)	état	Interf	Ep. (m)	état	Interf	Ep. (m)	état	Interf
BB 1	0,05	S	C	0,06	S	C	0,055	S	C

Résultats de carottage									
	Zone fissurée/faiencée dans bandes de roulement								
	Carottage 4			Carottage 5			Carottage 6		
	Ep. (m)	état	Interf	Ep. (m)	état	Interf	Ep. (m)	état	Interf
BB 1	0,045	Fis	C	0,05	Fis	C	0,04	Fis	C

État des matériaux : S : sain ; Fis : fissuré ; Frag : fragmenté , Dés : désagrégé
 Qualité de l'interface : C : collée ; SC : semi collée ; D : décollée

3.9.1.7 Sondages

Le sondage réalisé met en évidence, outre la couche d'enrobé souple, une couche de réglage en matériau non traité propre d'environ 0,12 m, puis un hérissan d'une vingtaine de centimètre d'épaisseur, reposant lui-même sur un empierrement grossier de 0,25 m. Le sol en place est un loess classé A1 h.

3.9.2 Modélisation de la chaussée en place

3.9.2.1 Calcul n°1 : estimation du module du sol

Dans un premier temps, le module de l'enrobé bitumineux est pris égal au module de référence divisé par 2. La seule inconnue du problème est le module du sol support.

Les données nécessaires à l'estimation par calcul inverse du module du sol support sont les suivantes :

Nature	Épaisseurs (m)	Qualité des matériaux	Interfaces	Module (MPa)
BB	0,05	Fissuré	Collée	2700
GNT	0,12	Propre	Collée	600 ⁽¹⁾
Hérisson	0,10	Propre	Collée	2 x E _{Hérisson1}
	0,10	Propre	Collée	2 x E _{Empierrement2}
Empierrement	0,15	Propre	Collée	2 x E _{Empierrement1}
	0,10	Propre	Collée	2 x E _{Sol}
Sol en place	6,00	-	Collée	15 ⁽²⁾
Substratum	Infini	-	-	10000

(1) Le module d'une GNT propre et sèche peut atteindre 600 MPa.

(2) Estimé par calcul inverse

3.9.2.2 Calcul n°2 : estimation du module des couches bitumineuses

En l'absence de données type rayon de courbure mesuré, on adopte les valeurs forfaitaires de module pour les couches bitumineuses en fonction de l'état de fissuration et des carottages.

Nature	Épaisseurs (m)	Qualité des matériaux	Interfaces	Module (MPa)
BB	0,06	Fissuré	Collée	2000
GNT	0,02	Propre	Collée	600
Hérisson	0,10	Propre	Collée	240
	0,10	Propre	Collée	120
Empierrement	0,15	Propre	Collée	60
	0,10	Propre	Collée	30
Sol en place	4,49	-	Collée	15 ⁽¹⁾
Substratum	Infini	-	-	10000

(1) Estimé par calcul inverse

3.9.3 Calcul d'endommagement

On détermine l'endommagement de la chaussée en supposant que la chaussée a fonctionné en au moins une phase depuis sa construction :

Phase 1 : 5 cm de BB souple sur une GNT, probablement mise en œuvre sur l'ancienne chaussée (durée estimée : au moins 20 ans) ;

Le trafic est supposé avoir cru de 2 % par an depuis 20 ans. Par suite : $T(-20 \text{ ans}) = 31 \text{ PL/j/sens}$.

Le calcul de l'endommagement se fait en une seule phase.

La couche de roulement est supposée à l'état neuf ($E = 5400 \text{ MPa}$). Le module du sol support et celui de la GNT résulte des étapes de calage préliminaires.

Le schéma de la structure est le suivant :

Matériaux	Phase 1	
	H (m)	E (MPa)
BB souple	0,05	5 400
GNT	0,12	600
GNT	0,10	240
GNT	0,10	120
GNT	0,15	60
GNT	0,10	30
Sol	6,00	15
Substrat	infini	10000

Les valeurs de déformation calculées et le calcul de l'endommagement sont résumés dans le tableau ci-après.

	Phase 1
déflexion (1/100 mm)	164
PL/J/sens (à l'origine)	31
Durée	20
Taux (%)	2
N réel	274 925
Couche de surface	
Eps t (μ déf)	201,6 ⁽¹⁾
Obtenu pour h_{BB} (m)	0,08
NE_{adm}	753 900
N_{PL} (CAM = 0,50)	1 507 801
D élémentaire BB	0,18
Sol support	
Eps z (μ déf)	1 219,6
NE_{adm}	108 542
NPL (CAM = 0,50)	217 084
D élémentaire SOL	1,27

(1) La déformation ϵ_{ps} à la base de la première couche de béton bitumineux est de 166,9 μ déf pour $h=0,05m$. Étant sur la partie gauche de la courbe en cloche, on recherche la valeur maximale de déformation qui vaut 201,6 μ déf, obtenue pour une épaisseur de BB de 0,08m.

Nota : les calculs de NE_{adm} (BB) ont été faits avec $\epsilon_b = 150 \mu$ déf, $-1/b = 5$, $kc=1.1$, $kr=1$ (R=50%), $ks=1$

3.9.4 Analyse et commentaires

L'endommagement accumulé par la structure est de 0,18 pour la couche de roulement et de 1,27 pour la couche de sol : on constate que la structure s'endommage donc principalement par déformation permanente du sol support.

Le fait que le dommage élémentaire soit légèrement supérieur à 1 montre que la structure en place a atteint sa durée de vie maximale, ce qui semble cohérent avec le niveau de dégradation relevé, et nécessite effectivement un renforcement structurel adapté.

4 Les chaussées bitumineuses épaisses

4.1 Pathologies des chaussées bitumineuses épaisses

Sur les chaussées bitumineuses épaisses, les principales dégradations observées sont les suivantes :

- fissuration due au vieillissement ;
- fissuration et faïençage de fatigue (par le bas et/ou par le haut) ;
- fissuration d'adaptation de la structure ;
- autres fissures (fissures transversales) ;
- arrachements de surface ;
- orniérage par fluage des couches supérieures ;
- et pour les moins épaisses orniérage à grand rayon et déformation en rive.

De plus, les dégradations de type fissuration peuvent être recouvertes en partie ou en totalité par des réparations, qui les masquent ; ces réparations doivent donc être considérées comme des dégradations existantes, de moindre activité.

4.2 Découpage en zones homogènes

Le découpage en zones homogènes est établi à partir :

- de la structure théorique ;
- du trafic ;
- de la déflexion (et du rayon de courbure) ;
- des dégradations (fissuration et orniérage) ;
- de l'état du drainage.

4.2.1 Découpage en zones homogènes à partir de la déflexion et du rayon de courbure

La valeur de la déflexion mesurée sur une chaussée bitumineuse épaisse dépend de l'épaisseur et de l'état résiduel des couches bitumineuses ainsi que de la qualité de la plate forme support (couche de forme comprise, qu'elle soit traitée ou non). Par suite, sa valeur caractéristique constitue un indicateur du comportement mécanique de l'ensemble structure/support de chaussée.

Le tableau 17 précise la classe de déflexion à retenir en fonction de la valeur caractéristique issue des mesures par 200 m. Il fournit un qualificatif du comportement global de la chaussée en fonction du trafic.

Classes	≤ D2	D3	D4	≥ D5
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 29	de 30 à 44	de 45 à 74	≥ 75
Niveau global de comportement en fonction de la classe de trafic				
T1 – T0	Bon	Moyen	Mauvais	
T3 – T2	Bon		Moyen	Mauvais

Tableau 17 - Classes des déflexions caractéristiques pour les chaussées bitumineuses épaisses

Le rayon de courbure est pour sa part plus sensible aux caractéristiques des couches liées et à la qualité des interfaces.

Les résultats des mesures du rayon sont généralement assez hétérogènes et peuvent atteindre des valeurs très élevées. C'est pour cela que sur une zone homogène la valeur caractéristique retenue est celle à 20 %. Le tableau 18 précise les classes de rayon à retenir en fonction de la valeur caractéristique.

Classes	R1	R2	R3	≥R4
Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 200	200 à 399	400 à 799	≥ 800

Tableau 18 - Classes de rayons de courbure pour les chaussées bitumineuses épaisses

4.2.2 Découpage en zones homogènes en fonction des dégradations

Le découpage de l'itinéraire en zones homogènes en dégradations se fait en fonction du type et de la gravité de la fissuration et du faïençage (et de leur localisation, dans ou hors bande de roulement), ainsi que du niveau de déformation permanente du profil en travers (orniérage).

Le tableau 19 précise la classe de fissuration/faïençage à retenir en fonction de la longueur cumulée affectée (exprimée en pour cent) issue du relevé.

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

Tableau 19 - Classement en zones homogènes en fonction du % de zones fissurées et faïencées pour les chaussées bitumineuses épaisses

Si les réparations affectent plus de 10 % du linéaire, le critère fissuration/faïençage est majoré d'une classe (à l'exception de la classe F1 reclassée en F3).

Si les réparations affectent plus de 30 % du linéaire, la majoration est de deux classes (à l'exception de la classe F1 reclassée en F4).

Nota : Les dégradations localisées aux bandes de roulement priment pour les niveaux F3 à F5 (présomption de fatigue de la structure) . Les niveaux F1 et F2 correspondent aux fissures non spécifiques aux bandes de roulement (présomption de vieillissement des matériaux de couche de surface).

Le tableau 20 précise la classe d'orniérage à retenir en fonction de la valeur maximale issue de la mesure.

Classes d'orniérage		Déformation en mm		
		< 10	10 à 20	> 20
Extension en %	≤ 10 %	O1	O2	O4
	> 10 %		O3	

Tableau 20 - Classes d'orniérage pour les chaussées bitumineuses épaisses

4.2.3 Agrégation des zones homogènes en dégradations, déflexion et orniérage

La synthèse des zones homogènes en déflexion, dégradations et orniérage conduit à un découpage fin, qu'il convient d'agréger en zones individuelles de taille suffisante (longueur minimale 100 m) pour disposer d'un nombre raisonnable de zones homogènes décrivant l'itinéraire.

Lors de l'agrégation, le niveau de déflexion/fissuration/orniérage retenu correspondra à la valeur maximale rencontrée sur la zone homogène.

4.3 Définition des sections témoins

Des sections témoins sont définies pour réaliser des essais complémentaires, essentiellement des carottages et des sondages, qui doivent permettre de comprendre les origines des dégradations constatées.

Les contraintes de sécurité et d'exploitation de la route sont prioritaires dans le choix de l'implantation de ces sections.

Remarque : une section témoin peut être l'ensemble de la section étudiée.

4.3.1 Implantation des carottages et des sondages

L'implantation des carottages est définie en fonction du niveau de dégradation relevé et de sa localisation (tableau 21). Il s'agit pour l'essentiel de différencier les fissures dues au vieillissement de l'enrobé (ou fissuration thermique), venant de la surface, et celles générées par un défaut d'interface ou de structure, venant de la base des couches (ou fissuration de fatigue).

Classe de fissuration/faïençage		F1	F2	F3	F4	F5
Nombre de carottes	Sur zone saine dans les bandes de roulement	4	2	4	3	2
	Sur faïençage, FL ou FT dans les bandes de roulement	-	-	3	4	5
	Sur faïençage, FL ou FT hors bandes de roulement	2	4	-	-	-
Total		6	6	7	7	7

Classe d'orniérage	O1	O2, O3, O4
Nombre de carottes	-	6

Tableau 21 - Implantation des carottages pour les chaussées bitumineuses épaisses


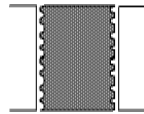

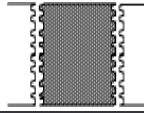
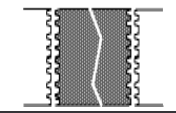
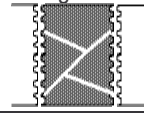
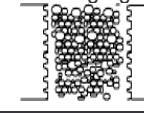
Nota : Les carottes sur dégradation seront réparties entre fissure longitudinale et faïençage lorsque les deux défauts existent. Lorsque l'orniérage atteint le niveau 2, on réalisera 6 carottes réparties sur 2 demi profils (une carotte en fond d'ornière et une de part et d'autre), voir chapitre 8.

Des sondages pourront être également réalisés lorsque l'on souhaite mieux caractériser le sol support, de la façon suivante :

- au moins un sondage par 1000 m pour connaître la structure et le sol en place, en zone peu dégradée ;
- un sondage sur zone présentant des défauts en rive, partant du milieu de la voie jusqu'à la rive (voir annexe 2).

4.3.2 Classification des matériaux prélevés sur carottes et lors des sondages

En ce qui concerne les *carottes*, la classification des matériaux constitutifs se fait pour chaque couche bitumineuse en tenant compte des deux éléments suivants : aspect de la carotte et qualité des parois de la cavité. La tenue de la carotte informe directement sur l'état des interfaces.

		Classification des matériaux des sous couches				
		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité de la paroi	Lisse	Sain 	Médiocre 	Fissuré 	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	Mauvais 	Mauvais 	Fragmenté 	Désagrégé 

Classification de la qualité des interfaces	
Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface

La coupe caractéristique des carottages pour une section témoin prendra en compte :

- l'épaisseur moyenne des couches (en éliminant les surépaisseurs importantes) ;
- la qualité des matériaux en retenant le cas suivant immédiatement le cas le plus défavorable que l'on élimine sauf s'il apparaît plus d'une fois ;
- la qualité des interfaces en retenant le cas suivant immédiatement le cas le plus défavorable que l'on élimine sauf s'il apparaît plus d'une fois.

En ce qui concerne les *sondages*, la classification des couches liées se fait conformément aux états décrits ci-avant, dans la mesure du possible. En ce qui concerne les matériaux des couches non liés, on décrira les critères suivants : qualité (propreté) et état hydrique des matériaux, limite des couches, arrivées d'eau éventuelles.

La coupe caractéristique des sondages pour une section témoin prendra en compte :

- l'épaisseur des couches et leur géométrie (affaissement localisé, tassement, orniérage) ;
- la qualité des matériaux ;
- la qualité des interfaces si possible.

4.4 Modélisation des sections témoins

Pour chaque zone homogène et en fonction des données de la section témoin, une synthèse des informations collectées est établie ainsi qu'une modélisation de la structure, dans le but de :

- déterminer le module du sol ;
- évaluer les modules des couches de chaussée et la qualité des interfaces à partir des mesures de rayon de courbure et/ou des informations obtenues à partir des carottages.

4.4.1 Détermination du module du sol par calcul inverse

Les épaisseurs prises en compte sont celles issues des carottages et sondages. Toutes les interfaces sont supposées collées sauf celles avérées décollées entre couches bitumineuses lors des carottages.

Les couches de graves non traitées sont découpées en sous-couches d'au plus 0,1 m d'épaisseur, exemple : une couche de 0,25 m se décompose en partant du bas en sous couches de 0,10 m, 0,10 m et 0,05 m.

Le sol, d'épaisseur fixée conventionnellement à 6 m, repose sur un massif semi-infini indéformable ($E \geq 10000$ MPa, $\nu = 0,25$), de façon à rendre compte de l'effet de la non linéarité du sol.

Les modules des matériaux bitumineux sont plus sensibles à la fréquence de la mesure qu'au taux de dégradations. Par suite, pour le calcul inverse du module du sol on adopte une valeur de module du matériau bitumineux égale à sa valeur de référence divisée par 2, en raison de la vitesse faible de mesure de la déformée, indépendamment du taux de fissuration à l'exception des matériaux fragmentés ou désagrégés dont les modules sont indiqués dans le tableau 23.

Les modules des matériaux non liés sont estimés à partir des valeurs de déflexion caractéristiques, en considérant que le module des matériaux granulaires des couches d'assises est proportionnel à celui de la couche sous-jacente : ce rapport k est fixé à 2. De plus, le module des matériaux granulaires ne peut dépasser une valeur maximale fonction de la propreté et de l'humidité constatées du matériau en place (tableau 22).

Humidité	Propreté		
	propre	pollué (1)	très pollué (2)
Sec (3)	600	400	400
Humide	400	400	200
Suintant (4)	400	200	200

(1) pourcentage de fines (passant à $63 \mu\text{m}$) > 12 et $MB_{0/D} < 0,8$

(2) pourcentage de fines (passant à $63 \mu\text{m}$) > 12 et $MB_{0/D} \geq 0,8$

(3) teneur en eau $\leq 3 \%$

(4) arrivée d'eau libre dans le trou de sondage

Tableau 22 - Module maximal des matériaux granulaires des couches de fondation pour les structures bitumineuses épaisses (MPa)

Le module du sol est déterminé par calcul inverse à partir de la valeur de la déflexion caractéristique de la section témoin.

4.4.2 Détermination du module des couches bitumineuses

La valeur médiane du rayon de courbure (et indépendamment de la valeur de la déflexion), et la valeur du module du sol déterminée par calcul inverse (et conséquemment celle des couches granulaires sus-jacentes), permettent de déterminer le module des couches bitumineuses, à la température de mesure et pour une fréquence estimée de 1 Hz, avec les conditions d'interface issues des carottages.

En l'absence de mesure du rayon de courbure, le module des matériaux bitumineux (tableau 23) est fonction de la carotte représentative de la section témoin (coupe caractéristique).

		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité des parois	Lisses	E_{ref}	$0,7 \times E_{ref}$	2000 MPa	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	$0,7 \times E_{ref}$	2000 MPa	1000 MPa	500 MPa

Tableau 23- Modules des matériaux bitumineux pour la modélisation en fonction de la qualité de la carotte et du trou de carottage

Nota : on attribue aux couches d'enduits superficiels un module de référence forfaitaire de 1000 MPa

4.5 Calcul de l'endommagement

Le calcul d'endommagement théorique peut se faire à partir de l'historique de la chaussée, en termes de dates et de natures des travaux, ainsi que du trafic supporté par la chaussée.

Cette approche calculatoire permet de confirmer un type de dégradation, ou d'en expliquer l'apparition précoce.

Le déroulement du calcul de l'exemple au § 4.8.1 suit la méthodologie décrite au § 2 « Analyse calculatoire ».

4.6 Cohérence entre le diagnostic et l'endommagement calculé

La cohérence entre l'endommagement calculé (si ce calcul est possible) et les dégradations observées est vérifiée.

Une chaussée est considérée comme peu dégradée si son endommagement est inférieur à 1, et fortement dégradée au-delà de cette valeur.

En cas de désaccord, on pourra chercher à adapter la modélisation de la structure en ajustant le module du sol support et les conditions d'interface en veillant à conserver un modèle de chaussée réaliste.

4.7 Synthèse du diagnostic

Les structures bitumineuses épaisses peuvent présenter des pathologies pouvant être classées en différents cas types.

Le classement de ces différents cas possibles s'effectue en fonction des types de fissuration et de déformation permanente, ainsi qu'en fonction de l'importance de celle-ci.

Déformation permanente		Fissuration					
		↙			↘		
↙	↘	Cas usuels			Cas particuliers		
Fluage de la CdRout ↓ Etude	Autre	Aucune	F1/F2	F3 à F6	Joint longitu.	Fiss. de rive	Fiss. adaptation
	O1	-	Pb thermique	Pb de fatigue	Colmater	Etude struc+	Etude géotech
	O2	Vérifier fatigue			Vérifier fatigue		

Schéma de principe permettant une pré-identification rapide de l'origine probable des désordres

4.8 Exemple de modélisation et de diagnostic d'une zone homogène

4.8.1 Données

4.8.1.1 Structure théorique

Épaisseurs	Matériaux	Année de réalisation
2 cm	BBTM	1994
4 cm	BBM	1987
4 cm	BBME	1987
7 cm	BBSG	1985
13 cm	GB 2	1985
25 cm	GNT	1985
	Sol D (GTR)	

Nota : l'entretien de 1987 est préventif (absence de désordre en surface) il est dû à un trafic à la mise en service nettement supérieur à celui estimé lors du projet.

4.8.1.2 Environnement

Route à 2 fois 2 voies

Terre plein central revêtu avec drainage interne

Accotement : largeur 2,5 m, revêtu par un enrobé

Fossé : présence d'une cunette et d'un drainage interne

Profil en travers : terrain naturel

4.8.1.3 Trafic

MJA 2006 : 1734 PL/J/sur la voie la plus chargée ; taux de progression annuel : 3 % géométrique ; CAM : 0,8 ;

Trafic à la mise en service : $1734/1,03^{2006-1985} = 932 \text{ PL/j/voie}$

Nombre cumulé d'essieux équivalents en 2006 : $TC_{Eq} = 365 \times 0,8 \times 932 \times [(1 + 0,03)^{21} - 1]/0,03 = 7804134$

4.8.1.4 Déflexion caractéristique

$d_c = 30/100^{\text{ème}}$ mm (déflectographe 03) et rayon caractéristiques à 20 % = 530 m

Classes	≤ D2	D3	D4	≥ D5
Seuils de déflexion caractéristique en $1/100^{\text{ème}}$ mm	de 0 à 29	de 30 à 44	de 45 à 74	≥ 75

Classes	R1	R2	R3	≥ R4
Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 200	200 à 399	400 à 799	≥ 800

4.8.1.5 Dégradations

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	\geq 20 %			

Classes d'orniérage		Déformation en mm		
		< 10	10 à 20	> 20
Extension en %	\leq 10 %	O1	O2	O4
	> 10 %		O3	

4.8.1.6 Carottages

Résultats de carottage												
	Zone saine			Zone saine			Sur FL dans BdR			Sur FL dans BdR		
	Carottage 1			Carottage 2			Carottage 3			Carottage 4		
	ép. (m)	état	Interf	ép. (m)	état	Interf	ép. (m)	état	Interf	ép. (m)	état	Interf
BBTM	0,02	S	C	0,025	S	C	0,03	Fis	C	0,02	Fis	C
BBM	0,03	S	C	0,035	S	C	0,04	Fis	C	0,04	Fis	C
BBME	0,03	S	C	0,04	S	C	0,03	Fis	C	0,05	Fis	C
BBSG	0,075	S	D	0,060	S	C	0,08	Fis	D	0,075	Fis	D
GB 2	0,12	S		0,125	S		0,13	Fis		0,135	S	

Résultats de carottage												
	Sur FL dans BdR			Sur FL dans BdR			Sur FL dans BdR					
	Carottage 5			Carottage 6			Carottage 7					
	ép. (m)	état	Interf	ép. (m)	état	Interf	ép. (m)	état	Interf			
BBTM	0,02	Fis	C	0,03	Fis	C	0,02	Fis	C			
BBM	0,03	Fis	C	0,04	Fis	C	0,04	Fis	C			
BBME	0,045	Fis	C	0,04	Fis	C	0,03	Fis	D			
BBSG	0,08	S	C	0,08	Fis	C	0,06	S	D			
GB 2	0,125	S		0,13	Fis		0,12	S				

État des matériaux : S : sain ; Fis : fissuré ; Frag : fragmenté , Dés : désagrégé
Qualité de l'interface : C : collée ; SC : semi collée ; D : décollée

4.8.2 Modélisation de la chaussée en place

4.8.2.1 Estimation du module du sol support

Correction de la déflexion (30/100 mm au deflectographe 03)

Le module à prendre en compte pour la correction de la déflexion est un module équivalent de la structure, calculé comme la moyenne des modules de chaque couche, pondérés par l'épaisseur respective des couches prises en compte :

$$E = \frac{(2700 \times (0,024 + 0,036 + 0,073) + 4500 \times 0,038 + 4650 \times 0,126)}{0,024 + 0,036 + 0,038 + 0,073 + 0,126} = 3758 \text{ MPa}$$

déflexion corrigée = $0,052 \times 3759 \times 0,297^3 / (12 \times (1 - 0,35^2)) + 0,6 \times 30 + 14 = 33/100 \text{ mm}$

Modélisation prise en compte pour effectuer le calcul inverse pour déterminer le module du sol

Nature	Épais. (m)	Etat des matériaux	Interface	Module (MPa)
BBTM	0,024	Fis	Collé	2700
BBM	0,036	Fis	Collé	2700
BBME	0,038	Fis	Collé	4500
BBSG	0,073	Fis	Décollé	2700
GB 2	0,126	Fis	Collé	4650
GNT3	0,05		Collé	2 x E _{GNT2} ⁽¹⁾
GNT2	0,10		Collé	2 x E _{GNT1} ⁽¹⁾
GNT1	0,10		Collé	2 x E _{sol} ⁽¹⁾
Sol classe GTR D	6,00		Collé	136 ⁽²⁾
Massif rigide	Semi infini			10000

⁽¹⁾ Le module de la GNT ne peut dépasser 600 MPa.

⁽²⁾ Estimé par calcul inverse

- déflexion calculée : 33/100 mm
- rayon calculé : 404 m

4.8.2.2 Estimation du module des matériaux bitumineux

Compte tenu de l'état, de fissuration dans les bandes de roulement, des matériaux au niveau des carottages, le module des couches bitumineuses est pris égal à 2000 MPa.

4.8.2.3 Modélisation de la structure en place à la date de l'étude d'entretien

Nature	Épais. (m)	Etat des matériaux	Interface	Module (MPa)
BBTM	0,024	Fis	Collé	2000
BBM	0,036	Fis	Collé	2000
BBME	0,038	Fis	Collé	2000
BBSG	0,073	Fis	Décollé	2000
GB 2	0,126	Fis	Collé	2000
GNT3	0,05		Collé	600
GNT2	0,10		Collé	544
GNT1	0,10		Collé	272
Sol classe GTR D	6,00		Collé	136
Massif rigide	Semi infini			10000

4.8.3 Calcul de l'endommagement

Le calcul de l'endommagement prend en compte les trois phases successives, fonction des travaux réalisés.

L'on retient pour les différents matériaux bitumineux à leur mise en service les caractéristiques mécaniques de référence (tableau en annexe 4).

Les schématisations (épaisseur, module, coefficient de Poisson, interface) aux différentes phases permettent de calculer les élongations horizontales dans les couches bitumineuses et verticales dans les matériaux non traités.

Pour chacune des phases on calcule pour chacune des couches :

- le nombre de cycles admissibles pour l'élongation calculée en adoptant un risque de 50 % ($NE_{adm 50\%}$) ;
- le nombre réel d'essieux équivalents qu'a supporté la couche (ne_{subi}), bien prendre en compte le CAM ;
- le dommage subi pour chaque couche ($ne_{subi}/NE_{adm 50\%}$).

Nota important : lors que le dommage pour une couche bitumineuse est égal à 1, le module de cette couche est ramené à 2000 MPa. Ainsi une phase peut être sous divisée pour tenir compte des conséquences sur les élongations et par la même sur les dommages dans les autres couches.

Phase 1 : Structure neuve 1985 – 1987

- Avec les données mécaniques de référence, les trafic cumulés, l'on calcule pour les différentes couches les déformations et les dommages.

Nature	Phase 1				
	Épais. (m)	Interf.	Module (MPa)	Epsi (μ def)	$NE_{adm 50\%}$ 10 ⁶
BBSG	0,073	Décollé	5400	121	1,27
GB 2	0,126	Collé	9300	107	1,75
GNT3	0,05	Collé	600		
GNT2	0,10	Collé	544		
GNT1	0,10	Collé	272		
Sol classe GTR D	6,00	Collé	136	362	
Massif rigide	Semi infini		10000		
ne 10 ⁶ matériaux bitumineux (1)					0,55
ne 10 ⁶ sol					0,69
Dommage BBSG/phase					0,43
Dommage BBSGcumulé					0,43
Dommage GB2/phase					0,31
Dommage GB2cumulé					0,31
Dommage Sol					0,10

$$(1) ne_{matériaux bit} = 365 \times 0,8 \times 932 \times \left[(1 + 0,03)^2 - 1 \right] / 0,03 = 552452$$

- Après 2 années de service les dommages dans les différentes couches sont faibles. On décide de conserver les modules des matériaux bitumineux à l'état neuf pour la suite de la modélisation.

Phase 2 : Premier entretien 1987 – 1994

- Calcul des dommages cumulés

Nature	Phase 2				
	Épais. (m)	Interf.	Module (MPa)	Epsi (μ def)	NE _{adm 50%} 10 ⁶
BBM	0,036	Collé	5400		
BBME	0,038	Collé	9000		
BBSG	0,073	Décollé	5400	125,8	1,05
GB 2	0,126	Collé	9300	74,3	10,8
GNT3	0,05	Collé	600		
GNT2	0,10	Collé	544		
GNT1	0,10	Collé	272		
Sol classe GTR D	6,00	Collé	136	302	16,0
Massif rigide	Semi infini		10000		
ne 10 ⁶ matériaux bitumineux (1)					2,21
ne 10 ⁶ sol					2,76
Domage BBSG/phase					2,10
Domage BBSGcumulé					2,53
Domage GB2/phase					0,20
Domage GB2cumulé					0,51
Domage Sol phase 2					0,17

$$(1) \text{ Trafic en 1987} = 989 \text{ PL/J/voie} ; ne_{\text{matériaux bit}} = 365 \times 0,8 \times 989 \times \left[(1 + 0,03)^7 - 1 \right] / 0,03 = 2,21 \cdot 10^6$$

- Le dommage cumulé dans le BBSG de 1985 est nettement supérieur à 1 ; dans ces conditions une décomposition de cette phase en 2, avant le dommage égal à 1 et après ce dommage est nécessaire.
- La première phase correspond à un BBSG « intact », la seconde à un BBSG endommagé et fissuré.
- Le dommage au niveau du BBSG, de la première partie de la phase 2, est donc de $1 - 0,43 = 0,57$. Par suite, la valeur de "ne_{phase 2 - 1ère partie}" pour le BBSG est de :

$$- ne_{\text{phase 2-1ère partie}}(\text{BBSG}) = d_{\text{phase 2-1ère partie}} \times NE_{\text{BBSG}} = 0,57 \times 1,05 \cdot 10^6 = 0,60 \cdot 10^6$$

$$- ne_{\text{phase 2-1ère partie}}(\text{sol}) = ne_{\text{phase 2-1ère partie}}(\text{BBSG}) / 0,80 = 0,75 \cdot 10^6$$

Nature	Phase 2.1					Phase 2.2					
	Épais. (m)	Interf.	Module (MPa)	Epsi (μ def)	NE _{adm} 50% 10 ⁶	Épais. (m)	Interf.	Module (MPa)	Epsi (μ def)	NE _{adm} 50% 10 ⁶	
BBM	0,036	Collé	5400			0,036	Collé	5400			
BBME	0,038	Collé	9000			0,038	Collé	9000	83,9	12,8	
BBSG	0,073	Décollé	5400	125,7	1,05	0,073	Décollé	2000	194,2		
GB 2	0,126	Collé	9300	74,2	10,9	0,126	Collé	9300	85,7	5,29	
GNT3	0,05	Collé	600			0,05	Collé	600			
GNT2	0,10	Collé	554			0,10	Collé	544			
GNT1	0,10	Collé	272			0,10	Collé	272			
Sol classe GTR D	6,00	Collé	136	302	16,0	6,00	Collé	136	330	10,7	
Massif rigide	Semi infini		10000			Semi infini		10000			
ne 10 ⁶ matériaux bitumineux					0,60						1,61
ne 10 ⁶ sol					0,75						2,01
Dommmage BBME/phase					0						0,12
Dommmage BBMEcumulé					0						0,12
Dommmage BBSG/phase					0,57						
Dommmage BBSGcumulé					1,00						
Dommmage GB2/phase					0,05						0,30
Dommmage GB2cumulé					0,36						0,66
Dommmage Sol					0,05						0,19

- A la fin de cette phase, le BBSG 1985 est théoriquement considéré comme fissuré, la GB2 atteint un dommage assez élevé de 0,66.

Phase 3 : Deuxième entretien 1994 – 2006

- Calcul des dommages cumulés

Nature	Phase 3				
	Épais. (m)	Interf.	Module (MPa)	Epsi (μ def)	NE _{adm 50%} 10 ⁶
BBTM	0,024	Collé	5400		
BBM	0,036	Collé	5400		
BBME	0,038	Collé	9000	87,2	10,6
BBSG	0,073	Décollé	2000	174,3	
GB 2	0,126	Collé	9300	74,2	10,9
GNT3	0,05	Collé	600		
GNT2	0,10	Collé	544		
GNT1	0,10	Collé	272		
Sol classe GTR D	6,00	Collé	136	299	14,8
Massif rigide	Semi infini		10000		
Ne 10 ⁶ matériaux bitumineux					5,04
Ne 10 ⁶ sol					6,30
Domage BBME/phase					0,47
Domage BBMEcumulé					0,59
Domage BBSG/phase					
Domage BBSGcumulé					
Domage GB2/phase					0,46
Domage GB2cumulé					1,12
Domage Sol					0,42

Conclusion :

- La GB2 a atteint un dommage légèrement supérieur à 1. La structure initiale peut être considérée comme fissurée. Des remontées de ces fissures peuvent apparaître en surface.
- L'endommagement sur le sol reste faible.

4.8.4 Cohérence entre le diagnostic et l'endommagement calculé

Le taux de dégradation élevé des fissurations/faiencages graves dans les bandes de roulement, l'absence d'orniérage, sont en bonne concordance avec les dommages calculés.

4.8.5 Synthèse du diagnostic

Nous sommes en présence d'une structure bitumineuse épaisse fissurée dont l'endommagement des couches bitumineuses a été initié par le mauvais collage entre la couche de roulement et la couche de base de la structure initiale.

4.9 Cas type de diagnostic

Les structures bitumineuses épaisses peuvent être classées en fonction de leur pathologie en 3 cas types :

- Cas type 1 : fissuration de surface de la couche de roulement ;
- Cas type 2 : dégradation interne des couches de surface ;
- Cas type 3 : fissuration de fatigue de l'assise ;

Les fiches 1 à 3 définissent les classes des différents paramètres relevés pour les 3 cas types.

Fiche 1 – Structure bitumineuse épaisse Fissuration de surface de la couche de roulement


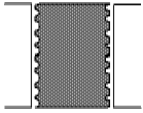
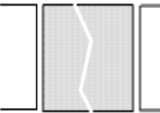
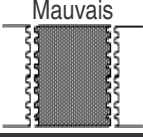
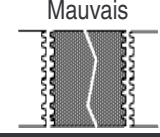
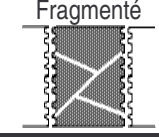
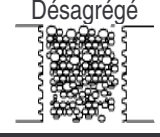
Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

Classes d'orniérage		Déformation en mm		
		< 10	10 à 20	> 20
Extension en %	≤ 10 %	O1	O2	O4
	> 10 %		O3	

Classes déflexion	≤ D2	D3	D4	≥ D5
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 29	de 30 à 44	de 45 à 74	≥ 75

Classes rayon	R1	R2	R3	≥ R4
Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 200	200 à 399	400 à 799	≥ 800

Classification des matériaux des sous couches

		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité de la paroi	Lisse	Sain 	Médiocre 	Fissuré 	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	Mauvais 	Mauvais 	Fragmenté 	Désagrégé 

Classification de la qualité des interfaces

Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface

Fiche 2 – Structure bitumineuse épaisse Dégradation interne des couches de surface


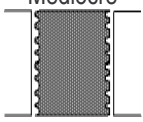
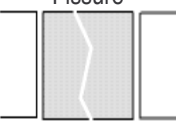
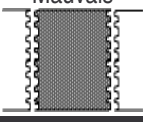
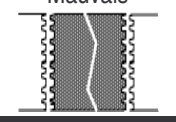
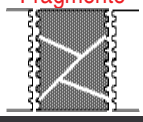
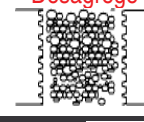
Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	\geq 20 %			

Classes d'orniérage		Déformation en mm		
		< 10	10 à 20	> 20
Extension en %	\leq 10 %	O1	O2	O4
	> 10 %		O3	

Classes déflexion	\leq D2	D3	D4	\geq D5
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 29	de 30 à 44	de 45 à 74	\geq 75

Classes rayon	R1	R2	R3	\geq R4
Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 200	200 à 399	400 à 799	\geq 800

Classification des matériaux des sous couches dégradées

		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité de la paroi	Lisse				Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré				

Classification de la qualité des interfaces

Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface

**Fiche 3 – Structure bitumineuse épaisse
Fissuration de fatigue de l'assise**

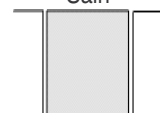
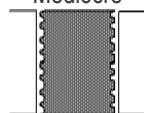
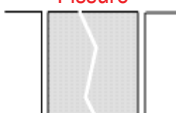
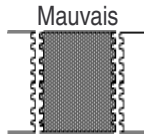
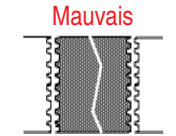
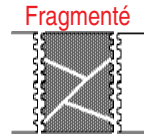
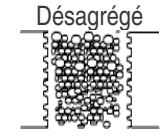
Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	\geq 20 %			

Classes d'orniérage		Déformation en mm		
		< 10	10 à 20	> 20
Extension en %	\leq 10 %	O1	O2	O4
	> 10 %		O3	

Classes déflexion	\leq D2	D3	D4	\geq D5
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 29	de 30 à 44	de 45 à 74	\geq 75

Classes rayon	R1	R2	R3	\geq R4
Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 200	200 à 399	400 à 799	\geq 800

Classification des matériaux des sous couches

		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité de la paroi	Lisse	Sain 	Médiocre 	Fissuré 	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	Mauvais 	Mauvais 	Fragmenté 	Désagrégé 

Classification de la qualité des interfaces

Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface

5 Les chaussées à structure inverse

5.1 Pathologies des chaussées à structure inverse

La particularité des structures inverses est de présenter à la fois des fissures de fatigue des couches bitumineuses et des fissures de retrait des matériaux traités aux liants hydrauliques.

Sur ces chaussées, les principales dégradations qui apparaissent sont les suivantes :

- fissuration transversale de retrait des MTLH ;
- fissuration et faïençage de fatigue (par le bas et/ou par le haut) ;
- affaissement localisé ;
- orniérage à grand rayon ;
- fissuration due au vieillissement ;
- fissuration d'adaptation de la structure ;
- autres fissures (joint, mise en œuvre, ...) ;
- arrachement de surface ;
- orniérage par fluage des couches bitumineuses.

Remarques sur la fissuration transversales :

- la fissuration franche n'est pratiquement jamais observée sur les chaussées à structure inverse ;
- lorsque la fissuration apparaît, elle est le plus souvent dédoublée, ramifiée ou fissurée, parfois avec affaissement ;
- la vitesse d'évolution de cette fissuration transversale est essentiellement fonction de l'épaisseur des matériaux bitumineux et des caractéristiques de la Grave Non Traitée et/ou de la présence d'eau dans cette grave.



Fissure de retrait dédoublée



Fissure de retrait ramifiée et faïencée



Fissure transversale colmatée, faïencée et affaissée

5.2 Découpage en zones homogènes

Le découpage en zones homogènes est établi à partir :

- de la structure théorique ;
- du trafic ;
- de la déflexion (et du rayon de courbure) ;
- des dégradations (fissuration et orniérage) ;
- de l'état du drainage.

5.2.1 Découpage en zones homogènes à partir de la déflexion et du rayon de courbure

Le niveau de déflexion rencontré sur ce type de structure dépend de l'épaisseur et de l'état de la couverture bitumineuse, de l'épaisseur et de l'état de la GNT (saturée d'eau ou non), ainsi que de la rigidité des couches d'assises traitées aux liants hydrauliques.

Le niveau de déflexion mesuré est un indicateur de l'état d'évolution de la structure. Toutefois lorsque le niveau de déflexions traduit une évolution significative, la chaussée est dans un état d'évolution avancé qui s'est généralement manifesté auparavant par d'autres indicateurs tels que les dégradations.

Le tableau 24 précise la classe de déflexion à retenir en fonction de la valeur caractéristique issue des mesures par 200 m. Il fournit un qualificatif du comportement global de la chaussée en fonction du trafic.

Classes	D1	D2	≥ D3
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 19	de 20 à 29	≥ 30
Niveau global de comportement	Bon	Moyen	Mauvais

Tableau 24- Classes de déflexion caractéristique pour les chaussées à structure inverse

Le tableau 25 précise la classe de rayon à retenir en fonction de la valeur caractéristique (à 20 %) issue des mesures par 200 m.

Classes	≤ R2	R3	≥ R4
Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 400	400 à 799	≥ 800

Tableau 25- Classes de rayons de courbure pour les chaussées à structure inverse

5.2.2 Découpage en zones homogènes en dégradations

Dans un premier temps le découpage se fera en 3 classes en fonction du nombre et de la gravité des Fissures Transversales (tableau 26).

Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Transversales / 100 m	graves	≤ 2	> 2	
	très graves	0	≤ 2	> 2

Tableau 26 - Classement en zones homogènes en fonction du % de fissures transversales pour les chaussées à structure inverse

Dans le cas de la présence de fissuration longitudinale et/ou de faïençage dans les bandes de roulement un nouveau découpage est à entreprendre en retenant les seuils définis au tableau 27.

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Fai)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Fai)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

Tableau 27 - Classement en zones homogènes en fonction du % de zones fissurées et faïencées

Si les réparations affectent plus de 10 % du linéaire, le critère fissuration/faïençage est majoré d'une classe (à l'exception de la classe F1 reclassée en F3).

Si les réparations affectent plus de 30 % du linéaire, la majoration est de deux classes (à l'exception de la classe F1 reclassée en F4).

Le tableau 28 précise la classe d'orniérage à retenir en fonction de la valeur maximale issue de la mesure.

Classes d'orniérage		Déformation en mm		
		< 10	10 à 20	> 20
Extension en %	≤ 10 %	01	02	04
	> 10 %		03	

Tableau 28 - Classes d'orniérage pour les chaussées à structure inverse

5.2.3 Agrégation des zones homogènes en dégradations, en déflexion et en orniérage

La synthèse des zones homogènes en déflexion, dégradations et ornière conduit à un découpage fin, qu'il convient d'agréger en zones individuelles de taille suffisante (longueur minimale 100 m) pour avoir un nombre raisonnable de zones homogènes décrivant l'itinéraire.

Lors de l'agrégation, le niveau de déflexion/fissuration/orniérage retenu correspondra à la valeur maximale rencontrée sur la zone homogène.

5.3 Définition des sections témoins

Des sections témoins sont alors définies pour y réaliser des essais complémentaires, essentiellement des carottages et des sondages, qui doivent permettre de comprendre les origines des dégradations constatées.

Les contraintes de sécurité et d'exploitation de la route sont prioritaires dans le choix de l'implantation de ces sections.

Remarque : une section témoin peut être l'ensemble de la section étudiée.

5.3.1 Implantation des carottages et des sondages

L'implantation des carottages est définie en fonction du niveau de dégradation relevé, et de sa localisation (tableau 29). Il s'agit pour l'essentiel de différencier les fissures dues au vieillissement de l'enrobé (ou fissuration thermique), venant de la surface, et celles issues de remontée des fissures de retrait du MTLH et/ou de fatigue du MTLH.

Sur les sections témoins l'implantation et le nombre de carottages est défini en fonction des dégradations.

Carottages sur Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Trans. / 100 m	Graves	≤ 2	> 2	
	Très graves	0	≤ 2	> 2
Zone caractéristique du cas		Pleine dalle	En bord de FT graves	En bord de FT très graves
Nombre de carottages	Sur zone saine	4	1	1
	En bord de FT graves	2	4	1
	En bord de FT très graves		1	4
Carottages sur Fissure Longitudinale et/ou Faiçage graves				
Nombre de carottages	Absence de FL + Fai	0		
	Σ % de (FL + Fai) < 2 %	1		
	Σ % de (FL + Fai) : 2 % à 5 %	2		
	Σ % de (FL + Fai) > 5 %	3		

Tableau 29 - Lieu des carottages en fonction des dégradations pour les chaussées à structure inverse

5.3.2 Sondages / carottages

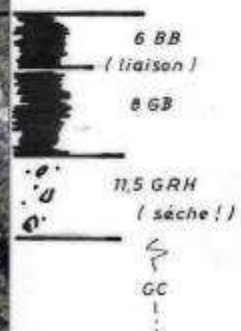
Afin d'extraire une carotte de la couche de matériaux traités aux liants hydrauliques, il est nécessaire au préalable de découper les couches bitumineuses et d'enlever la GNT, avant de carotter les MTLH.



- Bon aspect du site
- Localisations : du sondage, des carottes d'enrobé



Sondage :

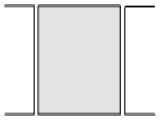
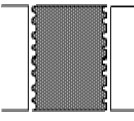
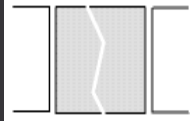
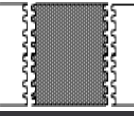
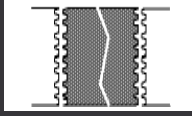
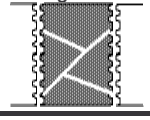
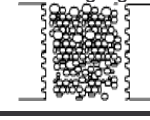


Carottage
(... à l'eau)
30 GC
bel aspect

Opération de carottage sur une structure inverse

5.3.3 Classification des matériaux prélevés aux carottages et lors des sondages

Elle se fera pour chaque sous-couche en tenant compte des 3 éléments suivants : qualité de la carotte, qualité des parois, état de l'interface.

		Classification des matériaux des sous couches				
		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité de la paroi	Lisse	Sain 	Médiocre 	Fissuré 	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	Mauvais 	Mauvais 	Fragmenté 	Désagrégé 

Classification de la qualité des interfaces	
Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface

La coupe caractéristique des carottages pour une section témoin prendra en compte :

- l'épaisseur moyenne des couches (en éliminant les surépaisseurs importantes) ;
- la qualité des matériaux en retenant le cas suivant immédiatement le cas le plus défavorable que l'on élimine sauf s'il apparaît plus d'une fois ;
- la qualité des interfaces en retenant le cas suivant immédiatement le cas le plus défavorable que l'on élimine sauf s'il apparaît plus d'une fois.

La GNT prélevée lors du sondage sera qualifiée par sa teneur en fines, sa valeur $MB_{0/D}$, sa teneur en eau.

Les résultats des teneurs en eau seront à moduler en fonction des conditions climatiques ayant précédé les prélèvements.

5.4 Modélisation des sections témoins

Pour chaque zone homogène et en fonction des données de la section témoin, une synthèse des informations collectées ainsi qu'une modélisation de la structure sont établies, dans le but de valider par le calcul les mécanismes ayant conduit aux dégradations observées.

5.4.1 Détermination du module des matériaux traités aux liants hydrauliques

Le module des matériaux traités aux liants hydraulique sera fonction de l'état des matériaux carottés (tableau 30).

La coupe caractéristique pour une section témoin prendra en compte :

- l'épaisseur moyenne des couches (en éliminant les cas atypiques) ;
- la qualité des matériaux en éliminant le cas le plus défavorable (sauf si celui-ci apparaît au moins 2 fois) ;
- l'interface en écartant le cas le plus défavorable (sauf si celui-ci apparaît au moins 2 fois).

		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité des parois	Lisses	E_{ref}	$E_{ref} \times 0,7$	7000 MPa	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	$E_{ref} \times 0,5$	7000 MPa	4000 MPa	200 MPa

Tableau 30 - Modules des matériaux traités aux liants hydrauliques pour la modélisation en fonction de la qualité de la carotte et des parois de la cavité

5.4.2 Détermination du module du sol par calcul inverse

Les épaisseurs prises en compte sont celles issues des carottages et sondages. Toutes les interfaces sont supposées collées (y compris avec la GNT) sauf celles avérées décollées entre couches liées lors des carottages.

Le sol, d'épaisseur fixée conventionnellement à 6 m, repose sur un massif semi-infini indéformable ($E \geq 10000$ MPa, $\nu = 0,25$), de façon à rendre compte de l'effet de la non linéarité du sol.

Les modules des matériaux bitumineux sont plus sensibles à la fréquence de la mesure qu'au taux de dégradations. Par suite, pour le calcul inverse du module du sol on adopte une valeur de module du matériau bitumineux égale à sa valeur de référence divisée par 2, en raison de la vitesse faible de mesure de la déformée, indépendamment du taux de fissuration à l'exception des matériaux fragmentés ou désagrégés dont les modules sont indiqués dans le tableau 32.

Le module de la GNT est indiqué dans le tableau 31 en fonction de sa propreté et de son humidité.

Humidité	Propreté		
	propre	pollué (1)	très pollué (2)
Sec (3)	400	200	200
Humide	200	200	100
Suintant (4)	200	100	100

(1) pourcentage de fines (passant à $63 \mu\text{m}$) > 8 et $MB_{0,D} < 0,8$

(2) pourcentage de fines (passant à $63 \mu\text{m}$) > 8 et $MB_{0,D} \geq 0,8$

(3) teneur en eau $\leq 3 \%$

(4) arrivée d'eau libre dans le trou de sondage

Tableau 31 – Module maximal des matériaux granulaires de la couche intermédiaire pour les structures inverses (MPa)

Le module des MTLH est déterminé à partir des carottages (tableau 30).

5.4.3 Détermination du module des couches bitumineuses

Le module des matériaux bitumineux sera fonction du taux de dégradations de la section témoin, de l'état des matériaux carottés et dans le cas de couches décollées du taux d'endommagement (tableau 32).

Les valeurs de rayon de courbure permettront de vérifier la pertinence des modules retenus par la modélisation.

		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité des parois	Lisses	E_{ref}	$0,7 \times E_{ref}$	2000 MPa	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	$0,7 \times E_{ref}$	2000 MPa	1000 MPa	500 MPa

Tableau 32 - Modules des matériaux bitumineux pour la modélisation en fonction de la qualité de la carotte et des parois de la cavité

5.5 Calcul de l'endommagement

Le calcul d'endommagement théorique peut se faire à partir de l'historique de la chaussée, en termes de dates et de natures des travaux, ainsi qu'en fonction du trafic supporté par la chaussée.

Cette approche calculatoire permet de confirmer un type de dégradation, ou d'en expliquer l'apparition précoce.

Le déroulement du calcul de l'exemple au § 5.8 suit la méthodologie décrite au § 2 « Analyse calculatoire ».

5.6 Cohérence entre le diagnostic et l'endommagement calculé

La cohérence entre l'endommagement calculé (si ce calcul est possible) et les dégradations observées est vérifiée.

Une chaussée est considérée comme peu dégradée si son endommagement est inférieur à 1, et fortement dégradée au-delà de cette valeur.

En cas de désaccord, on pourra chercher à adapter la modélisation de la structure en ajustant le module du sol support et les conditions d'interface, en veillant à conserver un modèle de chaussée réaliste.

5.7 Synthèse du diagnostic

Les structures inverses peuvent présenter des pathologies des chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques, si la couche de GNT est peu sensible à l'eau et si le drainage interne de la structure est efficace. Dans le cas contraire la pathologie est proche de celle des structures bitumineuses épaisses.

5.8 Exemple de modélisation et de diagnostic d'une zone homogène de chaussée à structure inverse

5.8.1 Données

5.8.1.1 Structure théorique

Épaisseurs	Matériaux	Année de réalisation
6 cm	BBSG	1997
8 cm	GB 2	1997
12 cm	GNT 0/20	1997
30 cm	GC 3	1997
	Sol A2 (GTR)	

5.8.1.2 Environnement

Route à 2 fois 2 voies

Terre plein central non revêtu sans drainage interne

Accotement : largeur 2,5 m, revêtu par un enduit superficiel

Fossé : profondeur 80 cm, en bon état

Profil en travers : terrain naturel

5.8.1.3 Année de l'étude : 2006

Trafic

Trafic MJA 2006 : 296 PL/J/ sur la voie la plus chargée ; taux de progression annuel : 2 % géométrique ; CAM : 0,8 pour les matériaux bitumineux ; 1,3 pour les MTLH ; 1 pour les matériaux non traités ;

Trafic à la mise en service : $296 / (1,02^{2006-1997}) = 248 \text{ PL} / \text{j} / \text{voie}$

Nombre cumulé d'essieux équivalents en 2006 avec un CAM de 0,8 :

$$TC_{Eq} = 365 \times 0,8 \times 248 \times [(1 + 0,02)^9 - 1] / 0,02 = 0,71 \cdot 10^6$$

5.8.1.4 Déflexion caractéristique mesurée avec un déflectographe 03

$d_c = 28/100^{\text{ème}}$ mm et rayon médian : 350 m

Classes	D1	D2	≥ D3
Seuils de déflexion caractéristique en $1/100^{\text{ème}}$ mm	de 0 à 19	de 20 à 29	≥ 30

Classes	≤ R2	R3	≥ R4
Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 400	400 à 799	≥ 800

5.8.1.5 Dégradations

Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Transversales / 100 m	graves	≤ 2	> 2	
	très graves	0	≤ 2	> 2

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Fai)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Fai)	Graves	< 20 %	\geq 20 %			

Classes d'orniérage		Déformation en mm		
		< 10	10 à 20	> 20
Extension en %	\leq 10 %	O1	O2	O4
	> 10 %		O3	

5.8.1.6 Carottages

Résultats de carottage												
	Zone saine			En bord de FT graves			En bord de FT très graves			En bord de FT très graves		
	Carottage 1			Carottage 2			Carottage 3			Carottage 4		
	ép	état	Interf	ép	Etat	Interf	ép	état	Interf	ép	état	Interf
BB	5.5	S	C	6	Fis	C	6.5	Fis	C	5	Fis	C
GB	8	S		8	Fis		7	Fis		7.5	Fis	
GNT	11.5			12.5			14			12		
GC	25	S								29	S	

Résultats de carottage									
	En bord de FT très graves			En bord de FT très graves			Carottages sur Fissure Longitudinale et/ou Faïençage		
	Carottage 5			Carottage 6			Carottage 7		
	ép.	état	Interf	Ep	état	Interf	ép.	état	Interf
BB	4.5	Frag	C	5	Frag	C	5	Fis	C
GB	8.5	Frag		7.5	Frag		7.5	Fis	
GNT	11.5			13.5			12.5		
GC	30	S					27	S	

État des matériaux : S : sain ; Fis : fissuré ; Frag : fragmenté , Dés : désagrégé
Qualité de l'interface : C : collée ; SC : semi collée ; D : décollée

5.8.1.7 Essais sur la GNT

- Granulométrie

tamis	20	10	4	2	0.5	0.08
% passant	100	70	52	41	29	13.5

- Vbta = 9 %
- Teneur en eau : 7 %

5.8.2 Modélisation de la structure en place

5.8.2.1 Détermination du module du sol support

Correction de la déflexion (28/100 mm au déflectographe 03)

- Par convention pour les structures inverses la correction ne tient compte que de la rigidité de la couche de fondation, comme celle-ci est constituée de GC saine son module est pris égal à 23000 MPa
- $déflexion\ corrigée = 0,052 \times 23000 \times 0,278^3 / (12 \times (1 - 0,25^2)) + 0,6 \times 30 + 14 = 33/100\text{ mm}$
- Modélisation prise en compte pour effectuer le calcul inverse pour déterminer le module du sol

Nature	Épaisseur (cm)	Qualité des matériaux	Interface	Module (MPa)
BBSG	5.4	Référence	Collé	2700
GB	7.7		Collé	4650
GNT	12.5	Excès de fines, teneur en eau élevée	Collé	100
GC	27.8	Sain	Collé	23000
Sol classe GTR A2	600		Collé	71 (*)
Massif rigide	Semi infini			10000

(*) E calé par calcul inverse à partir des mesures de déflexions

- déflexion calculée : 33/100mm ; rayon calculé : 253 m

5.8.2.2 Estimation du module des matériaux bitumineux

Compte tenu de l'état, de fissuration dans les bandes de roulement, des matériaux au niveau des carottages, le module des couches bitumineuses est pris égal à 2000 MPa.

5.8.2.3 Modélisation de la structure actuellement en place

Nature	Épaisseur (cm)	Qualité des matériaux	Interface	Module (MPa)
BBSG	5.4	Référence	Collé	2000
GB	7.7		Collé	2000
GNT	12.5	Excès de fines	Collé	100
GC	27.8	Sain	Collé	23000
Sol classe GTR A2	600		Collé	71 (*)
Massif rigide	Semi infini			10000

(*) E calé par calcul inverse à partir des mesures de déflexions

5.8.3 Calcul de l'endommagement

La structure n'a reçu aucun entretien, le calcul de l'endommagement est réalisé depuis sa mise en service jusqu'au moment de l'étude

L'on retient pour les différents matériaux traités à leur mise en service les caractéristiques mécaniques de référence (tableau en annexe 4), pour la grave non traitée son module est estimé à partir de ses caractéristiques géotechniques (tableau 31).

La schématisation (épaisseur, module, coefficient de Poisson, interface) permet de calculer les élongations horizontales dans les couches bitumineuses, la contrainte horizontale maximale dans la couche en matériau traitée aux liants hydrauliques et verticales dans les matériaux non traités.

Pour chacune des couches on calcule :

- le nombre de cycles admissibles pour les sollicitations calculées en adoptant un risque de 50 % ($NE_{adm\ 50\%}$)
- le nombre réel d'essieux équivalents qu'a supporté la couche (ne_{subi}), bien prendre en compte le CAM ;
- le dommage subi pour chaque couche (ne_{subi}/NE_{adm}).

Nature	Épais. (m)	Interf.	Module (MPa)	Epsi (μ def)	Sigma (MPa)		$NE_{adm\ 50\%}$ 10 ⁶
BBSG	0,054	Collé	5400				
GB 2	0,077	Collé	9300	134			0,562
GNT	0,125	Collé	100	950			0,21
GC3	0,278	Collé	23000		0,629		2178
Sol classe GTR A2	6,00	Collé	71	96,1			2776
Massif rigide	Semi infini		10000				

ne 10 ⁶ matériaux bitumineux (CAM = 0,8)	0,72
ne 10 ⁶ GNT (CAM = 1)	0,9
ne 10 ⁶ matériaux traité aux liants hydrauliques (CAM = 1,3)	1,17
ne 10 ⁶ sol (CAM = 1)	0,9
Dommage GB2	1,28
Dommage GNT	4,3
Dommage GC3	0,09
Dommage sol	0,00

5.8.3.1 Cohérence entre le diagnostic et l'endommagement calculé

Le taux de dégradation élevé de fissures longitudinales et de faïençage dans les bandes de roulement est en bonne concordance avec le dommage calculé dans la couche de base en GB2.

Le dommage calculé pour la couche de GNT n'est pas en concordance avec le faible niveau d'orniérage.

La couche de fondation en GC3 n'est pas endommagée.

5.8.4 Synthèse du diagnostic

Nous sommes en présence d'une structure inverse dont les couches bitumineuses ont été détruites du fait de l'excès d'humidité d'une grave non traitée trop riche en fines.





La présence d'un terre plein central non revêtu et non drainé contribue à une teneur en eau élevée dans la couche de grave non traitée qui provoque sa faible rigidité.

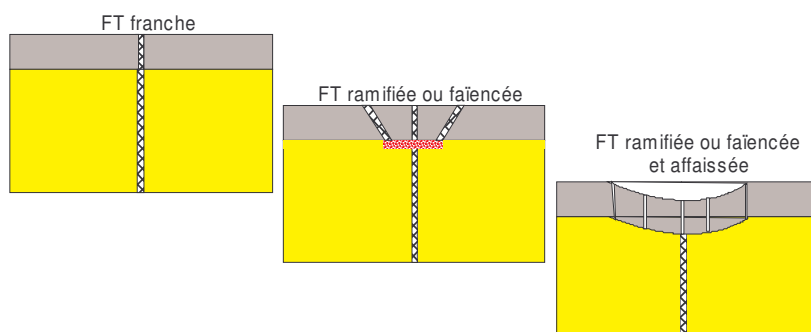
6 Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

6.1 Pathologies des chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

La particularité des chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques est de présenter des **fissures transversales de retrait** inhérentes aux graves hydrauliques.

Cette fissuration franche à l'origine se dégrade dans le temps en passant par les différents stades suivants :

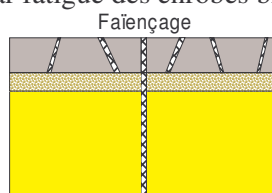
- | | | |
|---|--|---|
| 1 | Fissures franches |  |
| 2 | Fissures dédoublées |  |
| 3 | Fissures ramifiées ou faïencées (graves) |  |
| 4 | Fissures ramifiées ou faïencées avec affaissements (très graves) |  |



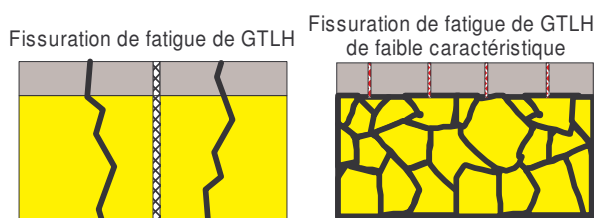
La vitesse d'évolution de ces fissures transversales est liée aux caractéristiques de la grave hydraulique (principalement à sa partie supérieure) et à la qualité de l'interface entre la couche de surface et la couche de base.

Les autres dégradations rencontrées fréquemment sur les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques sont :

- les **fissures longitudinales se transformant en faïencage dans la bande de roulement**, qui lui-même évolue avec l'apparition **d'affaissements localisés**. Ces dégradations sont généralement liées à de faibles caractéristiques de la partie supérieure des MTLH sous la couche bitumineuse et/ou un défaut de collage entre ces 2 couches, qui entraînent la rupture par fatigue des enrobés bitumineux ;



- les **fissurations de fatigue** aboutissant à un faïencage en dallots avec affaissements. Elles se rencontrent principalement sur les structures hydrauliques de moindre épaisseur (< 25 cm) et caractérisent la rupture des matériaux hydrauliques ;



- les fissurations thermiques des enrobés bitumineux.

6.2 Découpage en zones homogènes

Il sera établi principalement à partir :

- de la structure ;
- des dégradations et de la caractérisation du drainage ;
- des déflexions et des rayons de courbure.

6.2.1 Découpage en zones homogènes en dégradations

Dans un premier temps le découpage sera réalisé selon 3 classes en fonction du nombre et de la gravité des Fissures Transversales (tableau 32).

Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Transversales / 100 m	graves	≤ 2	> 2	
	très graves	0	≤ 2	> 2

Tableau 32 - Classement en zones homogènes en fonction du % de fissures transversales pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

En cas de présence de fissuration longitudinale et/ou de faïençage dans les bandes de roulement un nouveau découpage est à entreprendre en retenant les seuils définis au tableau 33.

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	$< 5 \%$	$< 5 \%$	5 à 10 %	10 à 30 %	$> 30 \%$
	Graves	$< 2 \%$	$< 2 \%$	2 à 5 %	5 à 10 %	$> 10 \%$
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	$< 20 \%$	$\geq 20 \%$			

Tableau 33 - Classement en zones homogènes en fonction de la somme des % de fissures longitudinales et de faïençage

Si les réparations affectent plus de 10 % du linéaire, le critère fissuration/faïençage est majoré d'une classe (à l'exception de la classe F1 reclassée en F3).

Si les réparations affectent plus de 30 % du linéaire, la majoration est de deux classes (à l'exception de la classe F1 reclassée en F4).

La présence de laitance au niveau des fissures transversales traduit généralement un phénomène d'attrition au niveau de l'interface couche de surface/couche de base traitée aux liants hydrauliques en présence d'eau. Si ce phénomène se rencontre sur une longueur supérieure à 200 m il est nécessaire de prendre en compte cette zone dans le découpage en zone homogène afin d'y appliquer un traitement spécifique.

Les causes les plus fréquentes de remontées de laitance sont :

- un mauvais accrochage couche de base/couche de surface ;
- un sous dimensionnement de la couche de surface ;
- une qualité insuffisante de la couche de base (dessiccation de surface, ségrégation, absence de prise) ;
- un feuilletage à la mise en œuvre ;
- un drainage insuffisant.

6.2.2 Découpage en zones homogènes en déflexions et rayons de courbure

Les déflexions sur ces structures sont fonction de l'épaisseur et de la qualité des graves traitées aux liants hydrauliques, du battement au niveau des fissures transversales et du traitement ou non de la plate forme support. Pour ces structures à assise traitée aux liants hydrauliques l'hétérogénéité des niveaux des déflexions est fréquemment un indicateur de mauvaise qualité structurelle.

Le tableau 34 précise la classe de déflexion à retenir en fonction de la valeur caractéristique issue des mesures par 200 m. Il fournit un qualificatif du comportement global de la chaussée en fonction du trafic.

Classes	D1	D2	D3	≥ D4
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 19	de 20 à 29	de 30 à 44	≥ 45
Niveau global de comportement				
Epaisseur de MTLH > 35 cm	Bon	Moyen	Mauvais	
Epaisseur de MTLH ≤ 25 cm	Bon		Moyen	Mauvais

Tableau 34 - Classes de déflexions pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Nota : les structures d'épaisseurs comprises entre 25 et 35 cm se rencontrent rarement. Si ce cas apparaît, on retiendra pour les assises traitées aux liants hydrauliques monocouches l'épaisseur de 25 cm et supérieure à 35 cm dans les autres cas.

Les rayons de courbure sur ce type de structure sont principalement fonction des caractéristiques de l'assise et de l'interface entre le MTLH et le matériau bitumineux sus-jacent. Ils sont généralement assez hétérogènes et peuvent atteindre des valeurs très élevées.

Le tableau 35 précise la classe de rayon à retenir en fonction de la valeur caractéristique (à 20 %) issue des mesures par 200 m.

Classes	≤R3	R4	R5	R6
Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 800	800 à 1199	1201 à 1599	≥ 1600

Tableau 35- Classes de rayon de courbure pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

6.2.3 Agrégation des zones homogènes en dégradations et déformabilité

La synthèse des zones homogènes en déflexions, dégradations et ornières conduit à un découpage fin, qu'il convient d'agréger en zones individuelles de taille suffisante (longueur minimale 100 m) pour disposer d'un nombre raisonnable de zones homogènes décrivant l'itinéraire.

Lors de l'agrégation, le niveau de déflexion/fissuration/orniérage retenu correspondra à la valeur maximale rencontrée sur la zone homogène.

6.3 Définition des sections témoins

Des sections témoins sont alors définies pour y réaliser des essais complémentaires, essentiellement des carottages et des sondages, qui doivent permettre de comprendre les origines des dégradations constatées.

Les contraintes de sécurité et d'exploitation de la route sont prioritaires dans le choix de l'implantation de ces sections.

Remarque : une section témoin peut être l'ensemble de la section étudiée.

6.3.1 Implantation des carottages et des sondages

Sur les sections témoins l'implantation et le nombre de carottages sont définis en fonction des dégradations (tableau 36).

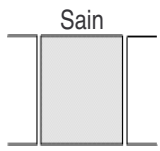
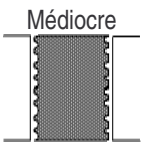
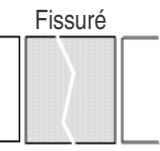
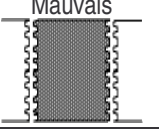
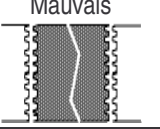
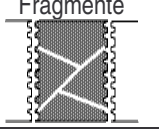
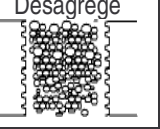
Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Trans. / 100 m	Graves	≤ 2	> 2	
	Très graves	0	≤ 2	> 2
Zone caractéristique du cas		Pleine dalle	En bord de FT graves	En bord de FT très graves
Nombre de carottages	Sur zone saine	4	1	1
	En bord de FT graves	2	4	1
	En bord de FT très graves		1	4
Carottages sur Fissure Longitudinale et/ou Faiçonnage	Absence de FL + Fai	0		
	FL + Fai < 2 %	1		
	FL + Fai 2 % à 5 %	2		
	FL + Fai > 5 %	3		

Tableau 36 - Lieu des carottages en fonction des dégradations pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Des sondages pourront aussi être réalisés dans le cas de dégradation en bord de chaussée du type affaissement-fissuration. Ils sont indispensables pour la conception de reconstruction de rive de chaussée.

6.3.2 Classification des matériaux prélevés par carottage

Elle se fera pour chaque sous-couche en tenant compte des 3 éléments suivants : qualité de la carotte, qualité des parois de la cavité, état de l'interface.

		Classification des matériaux des sous couches				
		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité de la paroi	Lisse				Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré				

		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité des parois	Lisses	E_{ref}	$E_{ref} \times 0,7$	7000 MPa	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	$E_{ref} \times 0,5$	7000 MPa	4000 MPa	200 MPa

Tableau 37 - Modules des matériaux traités aux liants hydrauliques pour la modélisation en fonction de la qualité de la carotte et du trou de carottage

Pour les interfaces, il sera distingué les 3 cas suivants :

Classification de la qualité des interfaces	
Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface Matériau désagrégé en place près de l'interface entre 2 couches liées

La coupe caractéristique pour une section témoin prendra en compte :

- l'épaisseur moyenne des couches (en éliminant les cas atypiques) ;
- la qualité des matériaux en éliminant le cas le plus défavorable (sauf si celui-ci apparaît au moins 2 fois) ;
- l'interface en écartant le cas le plus défavorable (sauf si celui-ci apparaît au moins 2 fois).

6.4 Modélisation des sections témoins

Pour chaque zone homogène et en fonction des données de la section témoin, une synthèse des informations collectées ainsi qu'une modélisation de la structure sont établies, dans le but de valider par le calcul les mécanismes ayant conduit aux dégradations observées.

6.4.1 Détermination du module du sol par calcul inverse

Les épaisseurs prises en compte sont celles issues des carottages et sondages. Toutes les interfaces sont supposées collées (y compris avec la GNT) sauf celles avérées décollées entre couches liées lors des carottages.

Les couches de graves non traitées sont découpées en sous-couches d'au plus 0,1m d'épaisseur, exemple : une couche de 0,25 m se décompose en partant du bas en sous couches de 0,10 m, 0,10 m et 0,05 m.

Le sol, d'épaisseur fixée conventionnellement à 6 m, repose sur un massif semi-infini indéformable ($E \geq 10000$ MPa, $\nu = 0,25$), de façon à rendre compte de l'effet de la non linéarité du sol.

Les modules des matériaux bitumineux sont plus sensibles à la fréquence de la mesure qu'au taux de dégradations. Par suite, pour le calcul inverse du module du sol on adopte une valeur de module du matériau bitumineux égale à sa valeur de référence divisée par 2, en raison de la vitesse faible de mesure de la déformée, indépendamment du taux de fissuration à l'exception des matériaux fragmentés ou désagrégés dont les modules sont indiqués dans le tableau 32.

Le module des MTLH (tableau 37) est déterminé à partir des carottages.

Les modules des matériaux non liés, en fondation, sont estimés à partir des valeurs de déflexion caractéristiques, en considérant que le module des matériaux granulaires des couches d'assises est proportionnel à celui de la couche sous-jacente : ce rapport k est fixé à 2. De plus, le module des matériaux granulaires (tableau 38) ne peut dépasser une valeur maximale fonction de la propreté et de l'humidité constatées du matériau en place.

Humidité	Propreté		
	propre	pollué (1)	très pollué (2)
sec	600	400	400
Humide	400	400	200
Suintant (3)	400	200	200

(1) pourcentage de fines (passant à 80 μm) > 12 et VBS < 0,1

(2) pourcentage de fines (passant à 80 μm) > 12 et VBS > 0,1

(3) arrivée d'eau libre dans le trou de sondage

Tableau 38– Module des matériaux non liés en MPa

Le module du sol est déterminé par calcul inverse à partir de la valeur de la déflexion caractéristique de la section témoin.

6.4.2 Détermination du module des couches bitumineuses

Le module des matériaux bitumineux sera fonction de l'état des matériaux carottés et dans le cas de couches décollées du taux d'endommagement (tableau 39).

		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité des parois	Lisses	Eref	0,7 x Eref	2000 MPa	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	0,7 x Eref	2000 MPa	1000 MPa	500 MPa

Tableau 39 - Modules des matériaux bitumineux pour la modélisation en fonction de la qualité de la carotte et des parois de la cavité

6.4.3 Détermination du module des matériaux traités aux liants hydrauliques

Le module des matériaux traités aux liants hydrauliques sera fonction de l'état des matériaux carottés (tableau 37).

6.4.4 Coupe caractéristique

La coupe caractéristique pour une section témoin prendra en compte :

- l'épaisseur moyenne des couches (en éliminant les cas atypiques) ;
- la qualité des matériaux en éliminant le cas le plus défavorable (sauf si celui-ci apparaît au moins 2 fois) ;
- l'interface en écartant le cas le plus défavorable (sauf si celui-ci apparaît au moins 2 fois).

6.5 Calcul de l'endommagement

Le calcul d'endommagement théorique peut se faire à partir de l'historique de la chaussée, en termes de dates et de natures des travaux, ainsi que du trafic supporté par la chaussée.

Cette approche calculatoire permet de confirmer un type de dégradation, ou d'en expliquer l'apparition précoce.

Le déroulement du calcul de l'exemple au § 6.8 suit la méthodologie décrite au § 2 « Analyse calculatoire ».

6.6 Cohérence entre le diagnostic et l'endommagement calculé

La cohérence entre l'endommagement calculé (si ce calcul est possible) et les dégradations observées est vérifiée.

Une chaussée est considérée comme peu dégradée si son endommagement est inférieur à 1, et fortement dégradée au-delà de cette valeur.

En cas de désaccord, on pourra chercher à adapter la modélisation de la structure en ajustant le module du sol support, les caractéristiques des matériaux traités aux liants hydrauliques et les conditions d'interface, en veillant à conserver un modèle de chaussée réaliste.

6.7 Synthèse du diagnostic – cas types

Les structures à assise traitée aux liants hydrauliques peuvent être classées en fonction de leur pathologie en 6 cas types :

- Cas type n°1 – Fissuration franche d'origine autre que la fatigue ;
- Cas type n°2 – Matériau traité sain mais fissuration transversale dégradée ;
- Cas type n°3 – Fissuration autre que la fatigue avec MTLH dégradé au droit des fissures ;
- Cas type n°4 – Problème d'interface à la partie supérieure du MTLH ;
- Cas type n°5 – Fissuration de fatigue franche ;
- Cas type n°6 – Perte de cohésion du MTLH, rupture par fragmentation multiple.

Les fiches 1 à 6 fournissent les classes des différents paramètres relevés pour les 6 cas types.

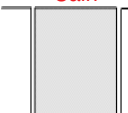
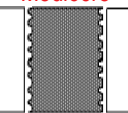
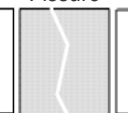
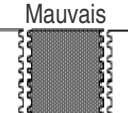
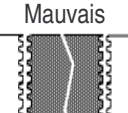
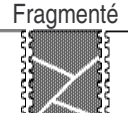
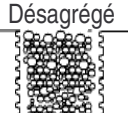
Fiche 1 - Structures à assise traitée aux liants hydrauliques
Fissuration franche d'origine autre que la fatigue

Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Transversales / 100 m	graves	≤ 2	> 2	
	très graves	0	≤ 2	> 2

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

Classes de déflexions	Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 19	de 20 à 29	de 30 à 44	≥ 45
	Épaisseur de MTLH > 35 cm	D1	D2	D3	≥ D4
	Épaisseur de MTLH ≤ 25 cm	D1	D2	D3	≥ D4

Classes de rayon de courbure	Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 800	800 à 1199	1201 à 1599	≥ 1600
	Épaisseur de MTLH > 35 cm	≤ R3	R4	R5	R6
	Épaisseur de MTLH ≤ 25 cm	≤ R3	R4	R5	R6

Classification des matériaux des sous couches						
		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité de la paroi	Lisse	Sain 	Médiocre 	Fissuré 	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	Mauvais 	Mauvais 	Fragmenté 	Désagrégé 

Classification de la qualité des interfaces	
Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface Matériau désagrégé en place près de l'interface entre 2 couches liées


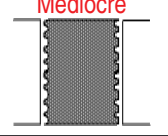
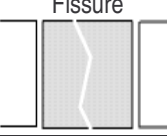
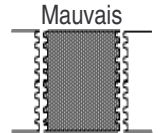
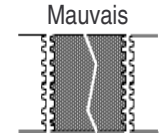
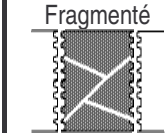
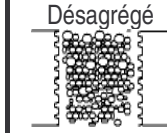
**Fiche n° 2 - Structures à assise traitée aux liants hydrauliques
Grave traitée saine mais fissuration transversale dégradée**

Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Transversales / 100 m	graves	≤ 2	> 2	
	très graves	0	≤ 2	> 2

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

Classes de déflexions	Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 19	de 20 à 29	de 30 à 44	≥ 45
	Épaisseur de MTLH > 35 cm	D1	D2	D3	≥ D4
	Épaisseur de MTLH ≤ 25 cm	D1	D2	D3	≥ D4

Classes de rayon de courbure	Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 800	800 à 1199	1201 à 1599	≥ 1600
	Épaisseur de MTLH > 35 cm	≤ R3	R4	R5	R6
	Épaisseur de MTLH ≤ 25 cm	≤ R3	R4	R5	R6

Classification des matériaux des sous couches						
		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité de la paroi	Lisse				Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré				

Classification de la qualité des interfaces	
Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison Problème d'interface au niveau des FT graves
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface Matériau désagrégé en place près de l'interface entre 2 couches liées

**Fiche n° 3 - Structures à assise traitée aux liants hydrauliques
Fissuration autre que la fatigue avec MTLH dégradée au droit des fissures**

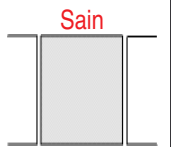
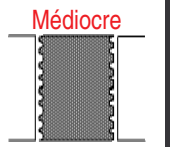
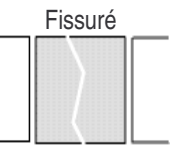
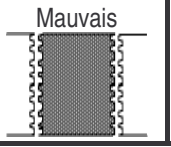
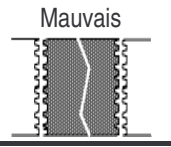
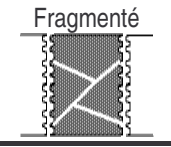
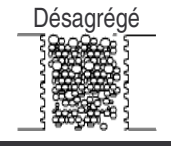
Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Transversales / 100 m	graves	≤ 2	> 2	
	très graves	0	≤ 2	> 2

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

Classes de déflexions	Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 19	de 20 à 29	de 30 à 44	≥ 45
	Épaisseur de MTLH > 35 cm	D1	D2	D3	≥ D4
	Épaisseur de MTLH ≤ 25 cm	D1	D2	D3	≥ D4

Classes de rayon de courbure	Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 800	800 à 1199	1201 à 1599	≥ 1600
	Épaisseur de MTLH > 35 cm	≤R3	R4	R5	R6
	Épaisseur de MTLH ≤ 25 cm	≤R3	R4	R5	R6

Classification des matériaux des sous couches

		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité de la paroi	Lisse				Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré				

Classification de la qualité des interfaces

Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface Matériau désagrégé en place près de l'interface entre 2 couches liées

**Fiche n° 4 – Structures à assise traitée aux liants hydrauliques
Problème d'interface à la partie supérieure de la MTLH**


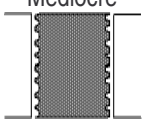
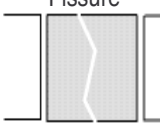
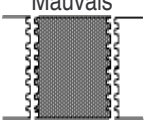
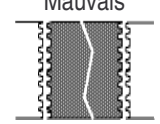
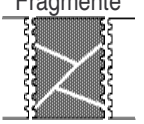
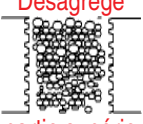
Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Transversales / 100 m	graves	≤ 2	> 2	
	très graves	0	≤ 2	> 2

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Fai)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Fai)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

Classes de déflexions	Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 19	de 20 à 29	de 30 à 44	≥ 45
	Épaisseur de MTLH > 35 cm	D1	D2	D3	≥ D4
	Épaisseur de MTLH ≤ 25 cm	D1	D2	D3	≥ D4

Classes de rayon de courbure	Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 800	800 à 1199	1201 à 1599	≥ 1600
	Épaisseur de MTLH > 35 cm	≤R3	R4	R5	R6
	Épaisseur de MTLH ≤ 25 cm	≤R3	R4	R5	R6

Classification des matériaux des sous couches

		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité de la paroi	Lisse	<p align="center">Sain</p>  <p align="center">(sauf en partie supérieure du MTLH)</p>	<p align="center">Médiocre</p> 	<p align="center">Fissuré</p> 	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	<p align="center">Mauvais</p> 	<p align="center">Mauvais</p> 	<p align="center">Fragmenté</p> 	<p align="center">Désagrégé</p>  <p align="center">en partie supérieure du MTLH</p>

Classification de la qualité des interfaces	
Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface Matériau désagrégé en place près de l'interface entre 2 couches liées

Fiche n° 5 - Structures à assise traitée aux liants hydrauliques
Fissuration de fatigue franche

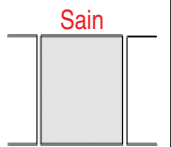
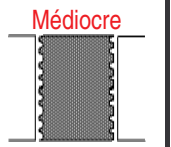
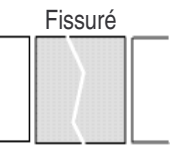
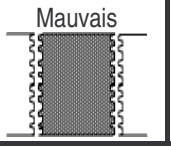
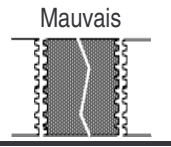
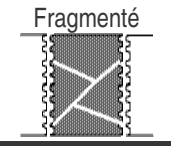
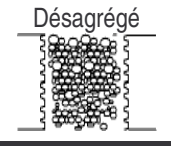
Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Transversales / 100 m	graves	≤ 2	> 2	
	très graves	0	≤ 2	> 2

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

Classes de déflexions	Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 19	de 20 à 29	de 30 à 44	≥ 45
	Épaisseur de MTLH > 35 cm	D1	D2	D3	≥ D4
	Épaisseur de MTLH ≤ 25 cm	D1	D2	D3	≥ D4

Classes de rayon de courbure	Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 800	800 à 1199	1201 à 1599	≥ 1600
	Épaisseur de MTLH > 35 cm	≤ R3	R4	R5	R6
	Épaisseur de MTLH ≤ 25 cm	≤ R3	R4	R5	R6

Classification des matériaux des sous couches

		Qualité de la carotte				
		<i>Saine</i>	<i>Médiocre</i>	<i>Fissurée</i>	<i>Fragmentée</i>	<i>Désagrégée</i>
Qualité de la paroi	<i>Lisse</i>	Sain 	Médiocre 	Fissuré 	Non rencontré	Non rencontré
	<i>Granulats arrachés</i>	Non rencontré	Mauvais 	Mauvais 	Fragmenté 	Désagrégé 

Classification de la qualité des interfaces

Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface Matériau désagrégé en place près de l'interface entre 2 couches liées

**Fiche n° 6 – Structures à assise traitée aux liants hydrauliques
Perte de cohésion du MTLH, rupture par fragmentation multiple**

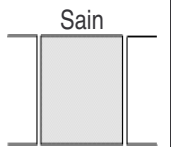
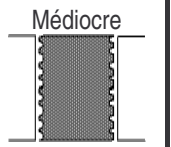
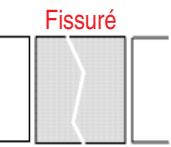
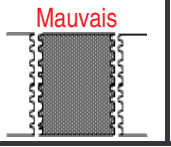
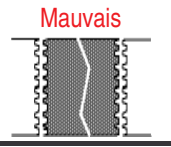
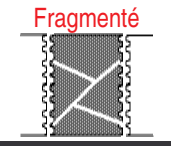
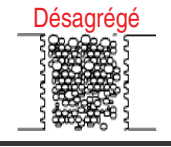
Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Transversales / 100 m	graves	≤ 2	> 2	
	très graves	0	≤ 2	> 2

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

Classes de déflexions	Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 19	de 20 à 29	de 30 à 44	≥ 45
	Épaisseur de MTLH > 35 cm	D1	D2	D3	≥ D4
	Épaisseur de MTLH ≤ 25 cm	D1	D2	D3	≥ D4

Classes de rayon de courbure	Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 800	800 à 1199	1201 à 1599	≥ 1600
	Épaisseur de MTLH > 35 cm	≤ R3	R4	R5	R6
	Épaisseur de MTLH ≤ 25 cm	≤ R3	R4	R5	R6

Classification des matériaux des sous couches

		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité de la paroi	Lisse				Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré				

Classification de la qualité des interfaces

Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface Matériau désagrégé en place près de l'interface entre 2 couches liées

6.8 Exemple de modélisation et de diagnostic d'une zone homogène

6.8.1 Données

6.8.1.1 Structure théorique

Épaisseurs	Matériaux	Année de réalisation
0,04 m	BBDr	1996
0,085 m	BBSG	1973
0,06 m	BBSG	1971
0,20 m	GC	1971
0,20 m	GNT	1971
	Sol A2 traité à la chaux sur 0,50 m (GTR)	

Nota : l'entretien de 1973 est préventif (absence de désordre en surface).

6.8.1.2 Environnement

Route à 2 x 2 voies

Terre plein central revêtu avec drainage interne

Accotement : largeur 2,5 m, revêtu par un enrobé

Fossé : présence d'un fossé de 1 m de profondeur

Profil en travers : terrain naturel

Année de l'étude : 2006

Trafic

MJA 2006 : 2280 PL/J/voie ; taux de progression annuel : 5 % géométrique ;

CAM : 1,3 pour les MTLH ; 0,8 pour les matériaux bitumineux ; 1 pour les matériaux non traités et le sol

Trafic à la mise en service : $2280/1,05^{2006-1971} = 413 \text{ PL} / \text{j} / \text{voie}$

Déflexion caractéristique $d_c = 36/100^{\text{ème}}$ mm (déflectographe 03) en 2006

Classes de déflexions	Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 19	de 20 à 29	de 30 à 44	≥ 45
	Épaisseur de MTLH > 35 cm	D1	D2	D3	≥ D4
	Épaisseur de MTLH ≤ 25 cm	D1	D2	D3	≥ D4

6.8.1.3 Dégradations

Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Transversales / 100 m	graves	≤ 2	> 2	
	très graves	0	≤ 2	> 2

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	\geq 20 %			

6.8.1.4 Carottages

Résultats de carottage												
	Zone saine			En bord de FT grave			En bord de FT grave			En bord de FT grave		
	Carottage 1			Carottage 2			Carottage 3			Carottage 4		
	ép. (m)	état	Interf	ép. (m)	état	Interf	ép. (m)	état	Interf	ép. (m)	état	Interf
BBDr	0,040	S	C	0,045	S	C	0,045	S	C	0,040	S	C
BBSG	0,08	S	C	0,085	S	D	0,09	S	D	0,08	S	C
BBSG	0,055	S	D	0,05	S	D	0,065	S	D	0,06	S	C
GC	0,275	S		0,225	S		0,21	S		0,20 0,05	S Dés	

Résultats de carottage												
	En bord de FT grave			En bord de FT grave								
	Carottage 5			Carottage 6								
	ép. (m)	état	Interf	ép. (m)	état	Interf						
BBDr	0,045	S	C	0,045	S	C						
BBSG	0,085	S	C	0,08	S	C						
BBSG	0,065	S	D	0,055	S	C						
GC	0,22	S		0,25	S							

État des matériaux : S : sain ; Fis : fissuré ; Frag : fragmenté , Dés : désagrégé

Qualité de l'interface : C : collée ; SC : semi collée ; D : décollée

6.8.2 Modélisation de la chaussée en place

6.8.2.1 Estimation du module du sol support

Correction de la déflexion (36/100 mm au déflectographe 03)

La formule de correction des déflexions mesurées à appliquer est la suivante :

$$\text{déflexion corrigée} = 0,052 \times 23000 \times 0,238^3 / (12 \times (1 - 0,25^2)) + 0,6 \times 36 + 14 = 37 / 100 \text{ mm}$$

Modélisation prise en compte pour effectuer le calcul inverse pour déterminer le module du sol

Nature	Épais. (m)	Qualité des matériaux	Interface	Module (MPa)	Coefficient de Poisson
BBDr	0.043	Sain	Collé	1500	0,35
BBSG	0.083	Sain	Collé	2700	0,35
BBSG	0.058	Sain	Décollé	2700	0,35
GC	0.238	Sain	Collé	23000	0,25
GNT2	0,10		Collé	2 x E _{GNT1} ⁽¹⁾	0,35
GNT1	0,10		Collé	2 x E _{sol} ⁽¹⁾	0,35
Sol classe GTR A2	6,00		Collé	42 ⁽²⁾	0,35
Massif rigide	Semi infini			10000	0,25

⁽¹⁾ Le module de la GNT ne peut dépasser 600 MPa.

⁽²⁾ Estimé par calcul inverse

déflexion calculée : 36,9/100mm ; rayon calculé : 852 m

6.8.2.2 Estimation du module des matériaux bitumineux

Compte tenu de l'état des matériaux au niveau des carottages, de la faible fissuration dans les bandes de roulement (hors mis les fissures transversales), les modules des couches bitumineuses sont ceux de référence.

6.8.2.3 Estimation du module des matériaux traités aux liants hydrauliques

Compte tenu de l'état de la grave ciment au niveau des carottages, son module est celui de référence.

6.8.2.4 Schéma de la structure en place

Nature	Épais. (m)	Qualité des matériaux	Interface	Module (MPa)	Coefficient de Poisson
BBDr	0,043	Sain	Collé	3000	0,35
BBSG	0,083	Sain	Collé	5400	0,35
BBSG	0,058	Sain	Décollé	5400	0,35
GC	0,238	Sain	Collé	23000	0,25
GNT2	0,10		Collé	168	0,35
GNT1	0,10		Collé	84	0,35
Sol classe GTR A2	6,00		Collé	42	0,35
Massif rigide	Semi infini			10000	0,25

6.8.3 Calcul de l'endommagement

Le calcul de l'endommagement prend en compte les trois phases successives, fonction des travaux réalisés.

L'on retient pour les différents matériaux à leur mise en service les caractéristiques mécaniques de référence (tableau en annexe 4).

Les schématisations (épaisseur, module, coefficient de Poisson, interface) aux différentes phases permettent de calculer les élongations et les contraintes horizontales dans les couches traitées et verticales dans les matériaux non traités.

Pour chacune des phases on calcule pour chacune des couches :

- le nombre de cycles admissibles pour l'élongation ou la contrainte calculée en adoptant un risque de 50 % (NE_{adm 50%}),

- le nombre réel d'essieux équivalents qu'a supporté la couche ($n_{e_{subi}}$), bien prendre en compte le CAM.
- le dommage subi pour chaque couche ($n_{e_{subi}}/NE_{adm 50\%}$).

Phase 1 : Structure neuve 1971 – 1973

Avec les données mécaniques de référence, les trafics cumulés, l'on calcule pour les différentes couches les déformations et les dommages.

Phase 1						
Nature	Épais. (m)	Interf.	Module (MPa)	Epsi (μ def)	Sigma (MPa)	$NE_{adm 50\%} 10^6$
BBSG	0,058	Décollé	5400	-55,2		64,5
GC	0,238	Collé	23000		-1.35	0,023
GNT2	0,10	Collé	168			
GNT1	0,10	Collé	84			
Sol classe GTR A2	6,00	Collé	42	205		91,49
Massif rigide	Semi infini		10000			
ne 10^6 BBSG						0,25
ne 10^6 GC						0,40
ne 10^6 sol						0,31
Dommage BBSG/phase						0,004
Dommage GC/phase						17,4
Dommage Sol						0,003

- Après 2 années de service le dommage dans la couche de grave ciment est très élevé et est en contradiction avec l'état de surface de 1973 (absence de dégradation, mis en place d'un entretien préventif eu égard au dimensionnement de la structure vis-à-vis du trafic et du sol support).

Différentes suspicions peuvent être envisagées :

- Trafic plus faible et moins agressif : ce point semble peu réaliste eu égard à la valeur du dommage (il faudrait que le trafic ou son agressivité soit 17 fois moins élevé) ;
- Présence d'un sol support plus portante : le doublement du module du sol support ramène la contrainte à la base de la GC à 1,16 MPa et par la même conduit à un nombre d'essieux équivalent admissible ($NE_{adm 50\%}$) de 224373, valeur 2 fois plus faible que le nombre d'essieux équivalent subi ;
- Collage de la couche de BBSG sur la GC lors de cette phase : la contrainte dans la GC est ramenée à 1,15 MPa, valeur très proche de l'incidence du doublement du module du sol support ;
- Caractéristiques mécaniques de la grave ciment plus élevées.
- Les sollicitations au niveau du BBSG et du sol conduisent à durées de calcul très élevées.

Phase 2 : Premier entretien 1973 – 1996

Phase 2						
Nature	Épais. (m)	Interf.	Module (MPa)	Epsi (μ def)	Sigma (MPa)	NE _{adm 50%} 10 ⁶
BBSG	0,083	Collé	5400			
BBSG	0,058	Décollé	5400	73,1		15,8
GC	0,238	Collé	23000		1,27	0,057
GNT2	0,10	Collé	168			
GNT1	0,10	Collé	84			
Sol classe GTR A2	6,00	Collé	42	198		106,99
Massif rigide	Semi infini		10000			
ne 10 ⁶ BBSG						5,51
ne 10 ⁶ GC						8,95
ne 10 ⁶ sol						6,89
Dommage BBSG/phase						0,349
Dommage BBSG cumulé						0,352
Dommage GC/phase						157,04
Dommage GC cumulé						174,51
Dommage Sol/phase						0,064
Dommage Sol cumulé						0,068

Juste avant le second entretien le dommage cumulé dans le GC atteint une valeur très élevée 175, alors que l'entretien prévu n'est qu'un renouvellement de la couche de surface (absence de dégradation structurelle en surface).

Phase 3 : Deuxième entretien 1994 – 2006

Phase 3						
Nature	Épais. (m)	Interf.	Module (MPa)	Epsi (μ def)	Sigma (MPa)	NE _{adm 50%} 10 ⁶
BBDr	0,043	Collé	3000			
BBSG	0,083	Collé	5400			
BBSG	0,058	Décollé	5400	68,4		22,08
GC	0,238	Collé	23000		1,2	0,135
GNT2	0,10	Collé	168			
GNT1	0,10	Collé	84			
Sol classe GTR A2	6,00	Collé	42	192,4		121,75
Massif rigide	Semi infini		10000			
ne 10 ⁶ BBSG						5,137
ne 10 ⁶ GC						8,347
ne 10 ⁶ sol						6,421
Domage BBSG/phase						0,233
Domage BBSG cumulé						0,585
Domage GC/phase						61,86
Domage GC cumulé						236,4
Domage Sol/phase						0,053
Domage Sol cumulé						0,12

Après 35 ans le dommage cumulé dans la grave ciment atteint 236, les autres couches ont des faibles dommages.

6.8.4 Cohérence entre le diagnostic et l'endommagement calculé

Le faible taux de dégradation fissurations/faiénçages graves dans les bandes de roulement (< 2 %) n'est pas en cohérence avec le très fort dommage calculé dans la GC. Comme indiqué précédemment les caractéristiques mécaniques de la GC sont certainement meilleures que celles retenues pour la GC de référence.

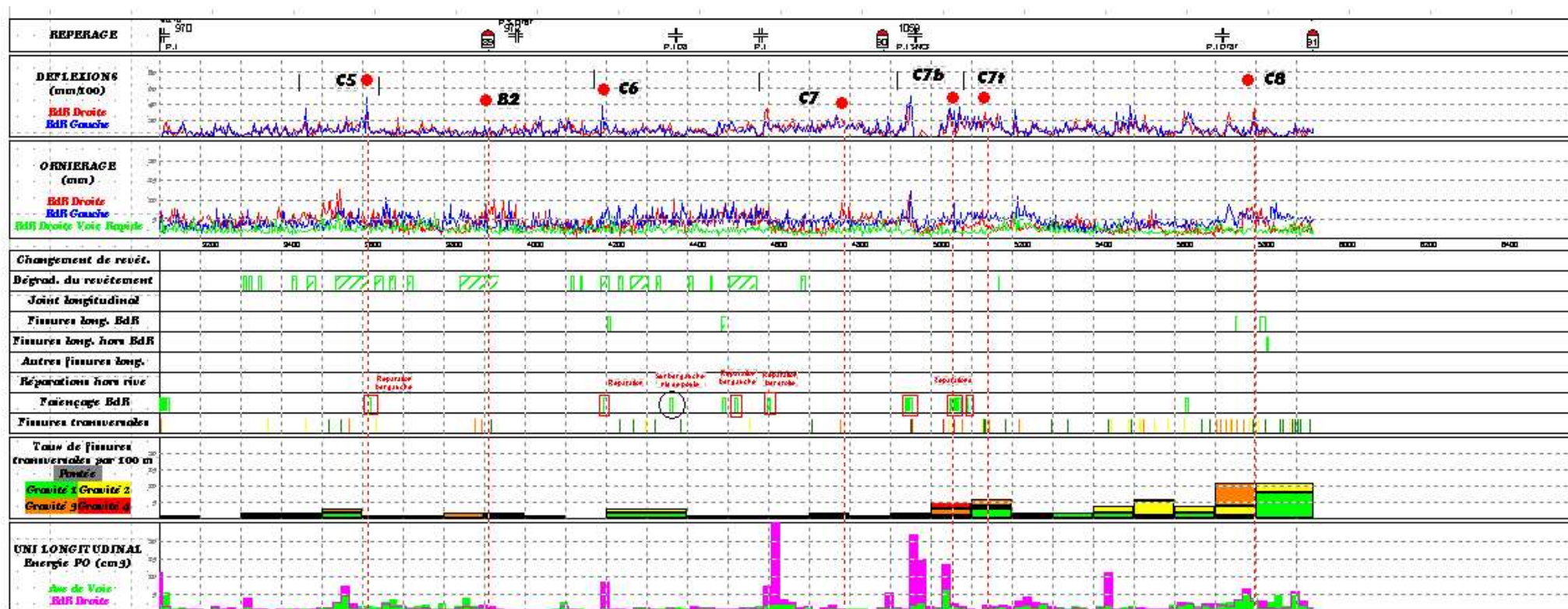
6.8.5 Synthèse du diagnostic

Nous sommes en présence d'une structure en assise traitée aux liants hydrauliques qui présente, après 35 ans et deux entretiens de faibles épaisseurs bitumineuses, de la fissuration de retrait et des déflexions assez élevées principalement dues aux battements au niveau de ces fissures de retrait.

Son bon comportement structurel est à mettre en relation avec l'état de la GC prélevée lors des carottages. Les déflexions élevées indiquent un manque ou une absence d'engrènement au niveau des fissures de retrait.

Exemple de découpage en zones homogènes pour une structure semi-rigide

Schéma itinéraire déflexion - dégradation « original »



Découpage en zones homogènes dégradations : Fissuration transversales

1 – Nombre de Fissures transversales par 100 mètres en fonction de leur gravité

Fissures Transversales Nombre pour 100m	Nb. Fiss. trans.																					
Poissée	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Grav. 1	0	0	2	0	1	0	0	2	1	0	1	0	1	2	1	2	1	2	1	2	4	6
Grav. 2	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	4	2	1	3	1	
Grav. 3	1	0	1	1	0	2	0	0	0	0	1	0	2	1	0	1	0	6	2	0		
Grav. 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0		
Total	1	0	2	4	1	0	4	0	3	1	1	2	1	2	6	5	2	3	6	3	9	7

2 – Classement suivant les 3 cas des zones de 100 mètres

Fissures Transversales Nombre pour 100m	Nb. Fiss. trans.																					
Poissée	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Grav. 1	0	0	2	0	1	0	0	2	1	0	1	0	1	2	1	2	1	2	1	2	4	6
Grav. 2	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	4	2	1	3	1	
Grav. 3	1	0	1	1	0	2	0	0	0	0	1	0	2	1	0	1	0	6	2	0		
Grav. 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0		
Total	1	0	2	4	1	0	4	0	3	1	1	2	1	2	6	5	2	3	6	3	9	7

2 1 2 2 1 1 2 1 2 1 1 1 2 2 2 3 2 2 1 2 3 2 3 2 2



3 - Découpage en zones homogènes en fissuration transversale

2

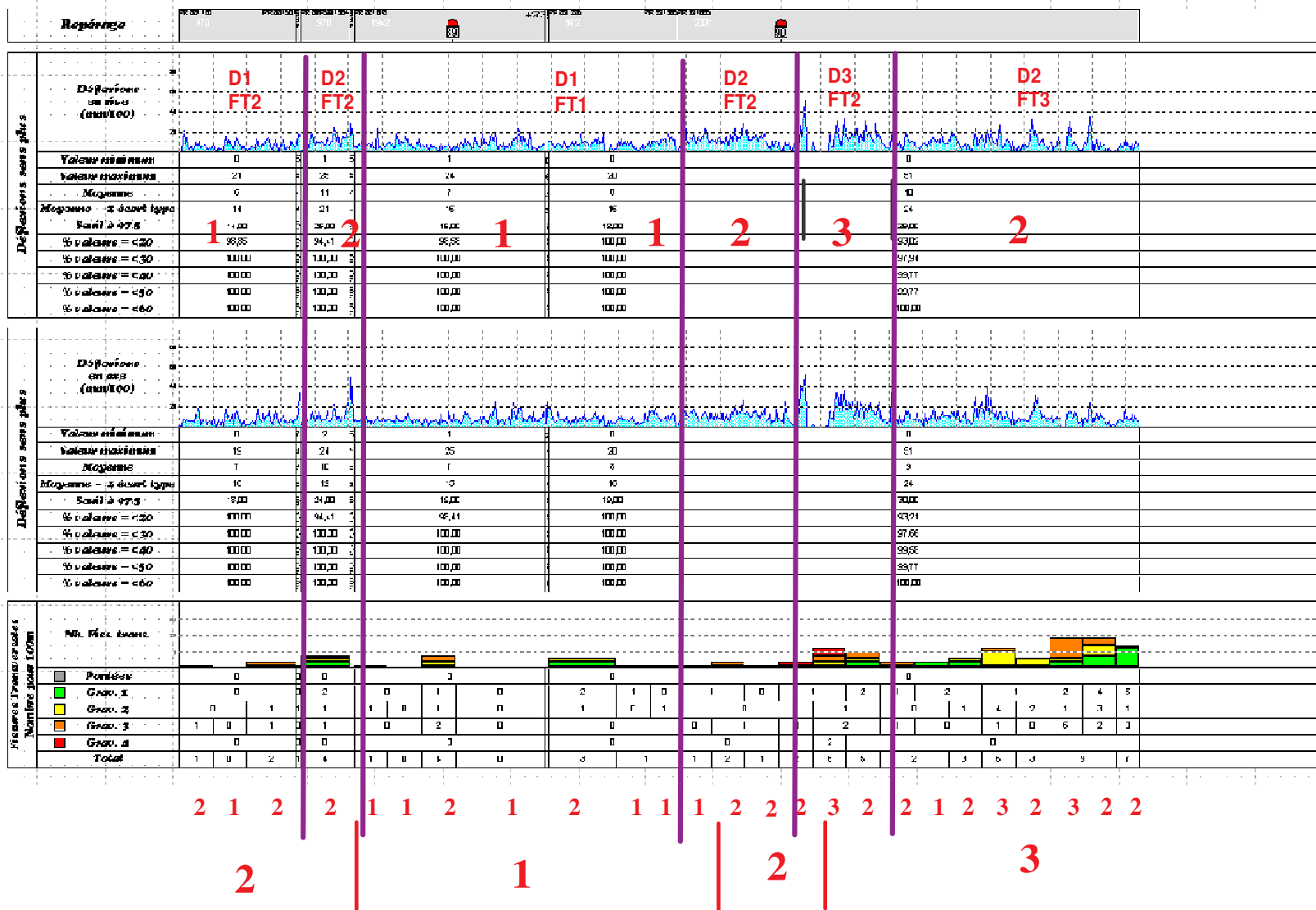
1

2

3



Découpage en zones homogènes déflexions et fissuration transversale



6.9 Traitement des problèmes non spécifiques aux chaussées en MTLH

Dans la démarche exposée précédemment les dégradations de surface peuvent justifier des travaux d'entretien pour les chaussées.

Le traitement de ces défauts sera réalisé de la manière suivante :

- examen des travaux nécessaires pour les problèmes spécifiques aux assises traitées aux liants hydrauliques ;
- examen des travaux nécessaires pour les problèmes dits de surface.

Les travaux à réaliser seront les plus importants de ceux résultants des deux démarches précédentes.

Les travaux nécessités par les problèmes de surface peuvent se décomposer en trois cas.

6.9.1 Orniérage

L'orniérage nécessite des travaux d'entretien dès que celui-ci dépasse 2 cm sur plus de 30 % du linéaire. Les travaux à réaliser sont les suivants :

- 30 % d'ornières de 2 à 3 cm sur BB âgés de plus de 5 ans ;
 - enduit pour trafics $\leq T_3$ après travaux préparatoires
 - BB 4 cm pour trafics T_2 après travaux préparatoires
 - étude spécifique pour trafics T_1 et T_0
- 30 % d'ornières > 3 cm sur BB ;
 - étude spécifique ou démarche Version 02.
- 30 % d'ornières de 2 à 3 cm sur BB âgés de moins de 5 ans ;
 - fraisage de la couche de roulement et mise en oeuvre d'une nouvelle couche de roulement de même épaisseur pour tous trafics.

6.9.2 Dégradations du revêtement de type glaçage ressuage, plumage, désenrobage

Dans le cas où le pourcentage de surfaces concernées par ces problèmes dépassent 30 % des travaux d'entretien sont nécessaires.

Ces travaux peuvent consister après préparation du support en des enduits pour des trafics allant jusqu'à T_1 et des BBTM pour les trafics T_0 .

6.9.3 Dégradations de revêtement de type désenrobage profond ou pelade.

Dès que ces défauts concernent plus de 10 % de la surface de la chaussée pour les trafics $> T_2$ et 20 % pour les trafics $\leq T_2$ des travaux globalisés sont nécessaires.

Ceux-ci consistent en un fraisage de la couche de roulement et son remplacement par une couche identique.

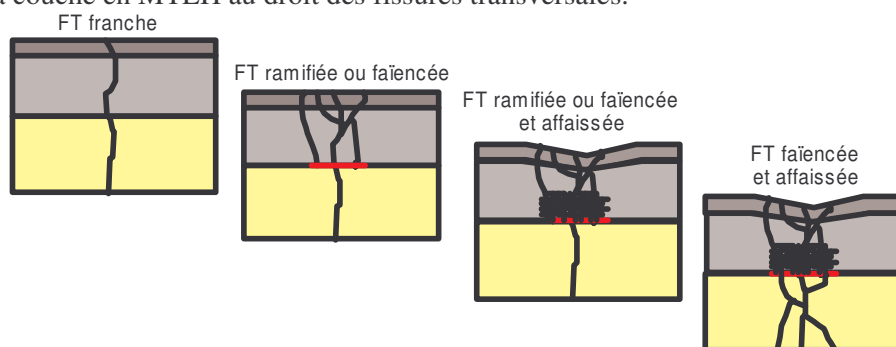
Dans les cas où les pourcentages de chaussées concernées par les défauts examinées dans le cas a, b ou c n'atteignent pas les pourcentages pris en compte, les travaux à réaliser sont de type ponctuels.

7 Les chaussées mixtes

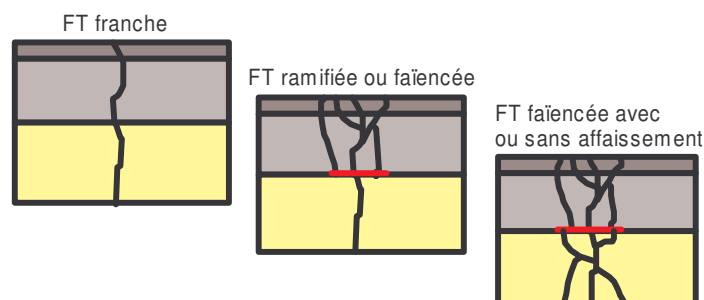
7.1 Pathologies types des chaussées mixtes

Elles sont très proches de celles des chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques. Elles diffèrent principalement par :

- l'évolution de la couche de base en GB qui du fait de la présence d'eau se désagrège dans le temps surtout au niveau des fissures transversales,
- la rupture de la couche en MTLH au droit des fissures transversales.



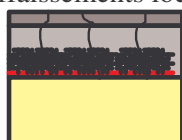
Évolution de chaussées mixtes au niveau des fissures transversales avec désagrégation de la grave bitume



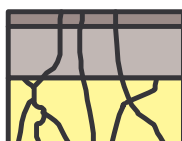
Évolution de chaussées mixtes au niveau des fissures transversales sans désagrégation de la grave bitume

Les autres dégradations rencontrées fréquemment sur les chaussées mixtes sont :

- les **fissures longitudinales allant vers le faïençage dans la bande de roulement** qui évolue avec l'apparition **d'affaissements localisés**. Ces dégradations sont généralement liées à des faibles caractéristiques de la couche de base en GB qui se désagrège ;
- les fissures longitudinales et faïençage avec affaissements localisés,



- les **fissurations de fatigue** aboutissant à un faïençage avec affaissements.



- les fissurations thermiques des enrobés bitumineux.

7.2 Découpage en zones homogènes

Il sera établi principalement à partir :

- de la structure ;
- des dégradations ;
- des déflexions et rayons de courbure.

7.2.1 Découpage en zones homogènes en dégradation

Dans un premier temps, le découpage se fera selon 3 classes en fonction du nombre et de la gravité des Fissures Transversales.

Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Transversales / 100 m	graves	≤ 2	> 2	
	très graves	0	≤ 2	> 2

Tableau 40 - Classement en zones homogènes en fonction du % de fissures transversales pour les chaussées mixtes

Dans le cas de la présence de fissuration longitudinale et/ou de faïençage dans les bandes de roulement un nouveau découpage est à entreprendre en retenant les seuils suivants :

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

Tableau 41 - Classement en zones homogènes en fonction de la somme des % de fissures longitudinales et de faïençage dans les bandes de roulement pour les chaussées mixtes

Si les réparations affectent plus de 10 % du linéaire, le critère fissuration/faïençage est majoré d'une classe (à l'exception de la classe F1 reclassée en F3).

Si les réparations affectent plus de 30 % du linéaire, la majoration est de deux classes (à l'exception de la classe F1 reclassée en F4).

7.2.2 Découpage en zones homogènes en déflexions et rayon de courbure

Les déflexions sur ces structures sont fonction de l'épaisseur et de la qualité des matériaux traités (aux liants hydrauliques et aux liants bitumineux), du battement au niveau des fissures transversales et du traitement ou non de la plate forme support. Pour ces structures mixtes, l'hétérogénéité des niveaux de déflexion est fréquemment un indicateur de mauvaise qualité structurelle.

Le tableau 42 précise la classe de déflexion à retenir en fonction de la valeur caractéristique issue des mesures par 200 mètres. Il fournit un qualificatif du comportement global de la chaussée en fonction du trafic.

Classes	D1	D2	≥ D3
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 19	de 20 à 29	≥ 30
Niveau global de comportement	Bon	Moyen	Mauvais

Tableau 42 - Classes de déflexions pour les chaussées mixtes

Les rayons de courbure sur ce type de structure sont principalement fonction des caractéristiques de l'assise et de l'interface entre le MTLH et le matériau bitumineux sus-jacent.

Les résultats des mesures du rayon de courbure sont généralement assez hétérogènes et peuvent atteindre des valeurs très élevées.

Le tableau 43 précise la classe de rayon à retenir en fonction de la valeur caractéristique (à 20 %) issue des mesures par 200 m.

Classes	≤ R3	R4	R5	R6
Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 800	800 à 1199	1201 à 1599	≥ 1600

Tableau 43 - Classes de rayon de courbure pour les chaussées mixtes

7.2.3 Agrégation des zones homogènes en dégradations et déformabilité

La synthèse des zones homogènes en déflexions, dégradations et ornières conduit à un découpage fin, qu'il convient d'agréger en zones individuelles de taille suffisante (longueur minimale 100 m) pour disposer d'un nombre raisonnable de zones homogènes décrivant l'itinéraire.

Lors de l'agrégation, le niveau de déflexion/fissuration/orniérage retenu correspondra à la valeur maximale rencontrée sur la zone homogène.

7.3 Définition des sections témoins

Des sections témoins sont alors définies pour y réaliser des essais complémentaires, essentiellement des carottages et des sondages, qui doivent permettre de comprendre les origines des dégradations constatées.

Les contraintes de sécurité et d'exploitation de la route sont prioritaires dans le choix de l'implantation de ces sections.

Remarque : une section témoin peut être l'ensemble de la section étudiée.

7.3.1 Implantation des carottages et des sondages

Sur les sections témoins l'implantation et le nombre de carottages sont définis en fonction des dégradations (tableau 44).


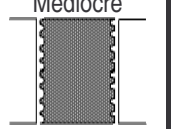
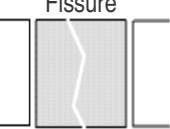
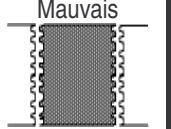
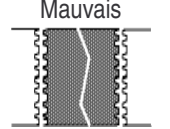
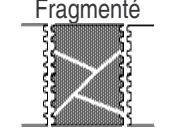
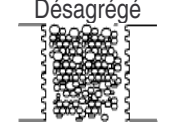

Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Trans. / 100 m	Graves	≤ 2	> 2	
	Très graves	0	≤ 2	> 2
Zone caractéristique du cas		Pleine dalle	En bord de FT graves	En bord de FT très graves
Nombre de carottages	Sur zone saine	4	1	1
	En bord de FT graves	2	4	1
	En bord de FT très graves		1	4
Carottages sur Fissure Longitudinale et/ou Faiénçage	Absence de FL + Fai	0		
	FL + Fai < 2 %	1		
	FL + Fai 2 % à 5 %	2		
	FL + Fai > 5 %	3		

Tableau 44 - Lieu des carottages en fonction des dégradations pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Des sondages pourront aussi être réalisés dans le cas de dégradation en bord de chaussée du type affaissement-fissuration. Ils sont indispensables pour la conception de reconstruction de rive de chaussée.

7.3.2 Classification des matériaux prélevés par carottage

Elle se fera pour chaque sous-couche en tenant compte des 3 éléments suivants : qualité de la carotte, qualité des parois de la cavité, état de l'interface.

		Classification des matériaux des sous couches				
		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité de la paroi	Lisse	Sain 	Médiocre 	Fissuré 	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	Mauvais 	Mauvais 	Fragmenté 	Désagrégé 
						

		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité des parois	Lisses	E_{ref}	$E_{ref} \times 0,7$	7000 MPa	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	$E_{ref} \times 0,5$	7000 MPa	4000 MPa	200 MPa

Tableau 45 - Modules des matériaux traités aux liants hydrauliques pour la modélisation en fonction de la qualité de la carotte et du trou de carottage

Pour les interfaces, il sera distingué les 3 cas suivants :

Classification de la qualité des interfaces	
Collée	Bon accrochage, bonne liaison
Semi collée	Liaison détruite au carottage (surface brillante de l'interface) Paroi lisse au niveau de la liaison
Décollée	Paroi avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et/ou érosion des bords des deux couches concernées et/ou présence de pollution au niveau de l'interface Matériau désagrégé en place près de l'interface entre 2 couches liées

7.4 Modélisation des sections témoins

Pour chaque zone homogène et en fonction des données de la section témoin, une synthèse des informations collectées ainsi qu'une modélisation de la structure sont établies, dans le but de valider par le calcul les mécanismes ayant conduit aux dégradations observées.

7.4.1 Détermination du module du sol par calcul inverse

Les épaisseurs prises en compte sont celles issues des carottages et sondages. Toutes les interfaces sont supposées collées sauf celles avérées décollées entre couches liées lors des carottages.

Le sol, d'épaisseur fixée conventionnellement à 6 m, repose sur un massif semi-infini indéformable ($E \geq 10000$ MPa, $\nu = 0,25$), de façon à rendre compte de l'effet de la non linéarité du sol.

Les modules des matériaux bitumineux sont plus sensibles à la fréquence de la mesure qu'au taux de dégradations. Par suite, pour le calcul inverse du module du sol on adopte une valeur de module du matériau bitumineux égale à sa valeur de référence divisée par 2, en raison de la vitesse faible de mesure de la déformée, indépendamment du taux de fissuration à l'exception des matériaux fragmentés ou désagrégés dont les modules sont indiqués dans le tableau 46.

Le module des MTLH (tableau 47) est déterminé à partir des carottages.

Le module du sol est déterminé par calcul inverse à partir de la valeur de la déflexion caractéristique de la section témoin.

7.4.2 Détermination du module des couches bitumineuses

Le module des matériaux bitumineux sera fonction de l'état des matériaux carottés et dans le cas de couches décollées du taux d'endommagement (tableau 48).

		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité des parois	Lisses	E_{ref}	$0,7 \times E_{ref}$	2000 MPa	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	$0,7 \times E_{ref}$	2000 MPa	1000 MPa	500 MPa

Tableau 46 - Modules des matériaux bitumineux pour la modélisation en fonction de la qualité de la carotte et des parois de la cavité

7.4.3 Détermination du module des matériaux traités aux liants hydrauliques

Le module des matériaux traités aux liants hydrauliques sera fonction de l'état des matériaux carottés (tableau 47).

7.4.4 Coupe caractéristique

La coupe caractéristique pour une section témoin prendra en compte :

- l'épaisseur moyenne des couches (en éliminant les cas atypiques) ;
- la qualité des matériaux en éliminant le cas le plus défavorable (sauf si celui-ci apparaît au moins 2 fois) ;
- l'interface en écartant le cas le plus défavorable (sauf si celui-ci apparaît au moins 2 fois).

7.5 Calcul de l'endommagement

Le calcul d'endommagement théorique peut se faire à partir de l'historique de la chaussée, en termes de dates et de natures des travaux, ainsi que du trafic supporté par la chaussée.

Cette approche calculatoire permet de confirmer un type de dégradation, ou d'en expliquer l'apparition précoce.

Le déroulement du calcul suit la méthodologie décrite au § 2 « Analyse calculatoire ».

7.6 Cohérence entre le diagnostic et l'endommagement calculé

La cohérence entre l'endommagement calculé (si ce calcul est possible) et les dégradations observées est vérifiée.

Une chaussée est considérée comme peu dégradée si son endommagement est inférieur à 1, et fortement dégradée au-delà de cette valeur.

En cas de désaccord, on pourra chercher à adapter la modélisation de la structure en ajustant le module du sol support, les caractéristiques des matériaux traités aux liants hydrauliques et les conditions d'interface, en veillant à conserver un modèle de chaussée réaliste.

7.7 Exemple de modélisation et de diagnostic d'une zone homogène

7.7.1 Données

7.7.1.1 Structure théorique

épaisseurs	matériaux	Année de réalisation
0,01 m	BBUM	1992
0,08 m	BBSG	1985
0,15 m	GB2	1985
0,22 m	GC	1985
	Sol C2 B51 sur 0,80 m (GTR)	

Nota : l'entretien de 1992 est appliqué sur un support ne présentant que des fissures transversales colmatées.

7.7.1.2 Environnement

Route à 2 x 2 voies

Terre plein central revêtu avec drainage interne

Accotement : largeur 2,5 m, revêtu par un enrobé

Fossé : présence d'un fossé de 1 m de profondeur

Profil en travers : terrain naturel

Année de l'étude : 2000

Trafic

MJA 2000 : 1400 PL/J/voie ; taux de progression annuel : 5 % géométrique ;

CAM : 1,3 pour les MTLH ; 0,8 pour les matériaux bitumineux ; 1 pour les matériaux non traités et le sol

Trafic à la mise en service : $1400 / (1,05^{2000-1985}) = 673 \text{ PL} / \text{j} / \text{voie}$

Déflexion caractéristique $d_c = 27/100^{\text{ème}}$ mm (déflectographe 03) en 2000

Classes de déflexions	D1	D2	≥ D3
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^{ème} mm	de 0 à 19	de 20 à 29	≥ 30

7.7.1.3 Rayon de courbure : non mesuré

Classes	≤ R3	R4	R5	R6
Seuils des rayons caractéristiques à 20 % en m	< 800	800 à 1199	1201 à 1599	≥ 1600

7.7.1.4 Dégradations

Classes Fissures Transversales		FT 1	FT 2	FT 3
Nbre de Fissures Transversales / 100 m	graves	≤ 2	> 2	
	très graves	0	≤ 2	> 2

Localisation des fissures/faïençage	Niveau de gravité	Classe de fissuration/faïençage				
		F1	F2	F3	F4	F5
Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Significatives	< 5 %	< 5 %	5 à 10 %	10 à 30 %	> 30 %
	Graves	< 2 %	< 2 %	2 à 5 %	5 à 10 %	> 10 %
Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï)	Graves	< 20 %	≥ 20 %			

7.7.1.5 Carottages

Résultats de carottage												
	Zone saine			Zone saine			Zone saine			Zone saine		
	Carottage 1			Carottage 2			Carottage 3			Carottage 4		
	ép. (m)	état	Interf	ép. (m)	état	Interf	ép. (m)	état	Interf	ép. (m)	état	Interf
BBUM	0,01	S	C	0,01	S	C	0,01	S	C	0,01	S	C
BBSG	0,07	S	C	0,065	S	D	0,06	S	C	0,06	S	C
GB	0,145	S	D	0,155	S	D	0,18	S	SC	0,08 0,08	S Dés	C
GC	0,255	S		0,25	S		0,215	S		0,22	S	

Résultats de carottage												
	En bord de FT			En bord de FT								
	Carottage 5			Carottage 6								
	ép. (m)	état	Interf	ép. (m)	état	Interf						
BBUM	0,01	S	C	0,01	S	C						
BBSG	0,065	S	C	0,05	S	C						
GB	0,05 0,11	Dés S	D	0,14	S	SC						
GC	0,225	S		0,265	S							

État des matériaux : S : sain ; Fis : fissuré ; Frag : fragmenté , Dés : désagrégé
Qualité de l'interface : C : collée ; SC : semi collée ; D : décollée

7.7.2 Modélisation de la chaussée en place

Estimation du module du sol support

Correction de la déflexion (27/100 mm au déflectographe 03)

Comme dans la majorité des cas l'interface GB/GC est décollé, pour le calcul de la correction de la déflexion l'on ne retient que l'épaisseur de la couche de GC.

La formule de correction des déflexions mesurées à appliquer est la suivante :

$$\text{déflexion corrigée} = 0,052 \times 23000 \times 0,238^3 / (12 \times (1 - 0,25^2)) + 0,6 \times 27 + 14 = 32 / 100 \text{ mm}$$

Modélisation prise en compte pour effectuer le calcul inverse pour déterminer le module du sol

Nature	Épais. (m)	Qualité des matériaux	Interface	Module (MPa)	Coefficient de Poisson
BBUM	0,01	Sain	Collé	1500	0,35
BBSG	0,062	Sain	Collé	2700	0,35
GB2	0,157	Sain	Décollé	4650	0,35
GC	0,238	Sain	Collé	23000	0,25
Sol C2 B51 sur 0,80 m (GTR)	6,00		Collé	52 ⁽¹⁾	0,35
Massif rigide	Semi infini			10000	0,25

⁽¹⁾ Estimé par calcul inverse

déflexion calculée : 32/100mm ; rayon calculé : 1118 m

Estimation du module des matériaux bitumineux

Compte tenu de l'état des matériaux au niveau des carottages, le module du BBUM et du BBSG sont ceux de référence, comme deux carottages présentent une GB désagrégée sur une partie de sa hauteur, cette couche sera divisée en 2 parties (0,05 m désagrégée ; 0,11 m saine).

7.7.2.1 Estimation du module des matériaux traités aux liants hydrauliques

Compte tenu de l'état de la grave ciment au niveau des carottages, son module est celui de référence.

7.7.2.2 Schéma de la structure en place

Nature	Épais. (m)	Qualité des matériaux	Interface	Module (MPa)	Coefficient de Poisson
BBUM	0,01	Sain	Collé	3000	0,35
BBSG	0,062	Sain	Collé	5400	0,35
GB2	0,05 0,107	Désagrégé	Décollé	200	0,35
		Sain		9300	0,35
GC	0,238	Sain	Collé	23000	0,25
Sol C2 B51 sur 0,80 m (GTR)	6,00		Collé	52 ⁽¹⁾	0,35
Massif rigide	Semi infini			10000	0,25

⁽¹⁾ Estimé par calcul inverse

7.7.3 Calcul de l'endommagement

Nous considérons que la mise en place du BBUM est négligeable comme apport structurel et par la même que la chaussée de sa mise en service à la date de l'étude n'a comporté qu'une phase.

L'on retient pour les différents matériaux à leur mise en service les caractéristiques mécaniques de référence (tableau en annexe 4).

Les schématisations (épaisseur, module, coefficient de Poisson, interface) permettent de calculer les elongations et les contraintes horizontales dans les couches traitées et verticales dans les matériaux non traités.

Pour chacune des couches, on calcule :

- le nombre de cycles admissibles pour l'élongation ou la contrainte calculée en adoptant un risque de 50 % ($NE_{adm 50\%}$),
- le nombre réel d'essieux équivalents qu'a supporté la couche (ne_{subi}), bien prendre en compte le CAM.
- le dommage subi pour chaque couche ($ne_{subi}/NE_{adm 50\%}$).

Nature	Épais. (m)	Interf.	Module (MPa)	Epsi (μ def)	Sigma (MPa)	NE _{adm 50%} 10 ⁶
BBUM	0,01	Collé	3000			
BBSG	0,062	Collé	5400			
GB2	0,157	Décollé	9300	47		106,7
GC	0,238	Collé	23000		1,015	1,66
Sol C2 B51 sur 0,80 m (GTR)	6,00	Collé	52	158,4		292
Massif rigide	Semi infini		10000			
ne 10 ⁶ GB2						4,6
ne 10 ⁶ GC						7,5
ne 10 ⁶ sol						5,8
Domage BBSG						0,04
Domage GC						4,5
Domage Sol						0,02

Après 15 années de service le dommage dans la couche de grave ciment est supérieur mais aussi proche de 1.

Différentes suspicions peuvent être envisagées :

- L'interface GB/GC était collé à l'origine et c'est détruit en fonction du temps.
 - Dans le cas d'un interface GB/GC collé la contrainte à la base de la GC est de 0,595 MPa, valeur qui conduit à un nombre de cycles admissible de 5000 10⁶.
 - Dans le cas d'un interface GB/GC semi-collé la contrainte à la base de la GC est de 0,805 MPa, valeur qui conduit à un nombre de cycles admissible de 54 10⁶.
- Notons la forte influence de la liaison à la partie supérieure de la grave ciment.

7.7.4 Cohérence entre le diagnostic et l'endommagement calculé

En fonction des conditions d'interface l'on peut considérer que la cohérence est satisfaisante.

7.7.5 Synthèse du diagnostic

Nous sommes en présence d'une structure mixte qui présente, après 15 ans de la fissuration de retrait peu grave et colmatée, des déflexions légèrement élevées certainement dues battements au niveau des fissures de retrait.

La présence de grave bitume désagrégée sur une partie de sa hauteur devra être prise en considération au niveau de la conception de l'entretien.

8 Orniérage des couches bitumineuses

8.1 Définition

L'orniérage des couches bitumineuses est un phénomène qui affecte principalement les couches de surface (liaison et roulement), parfois les anciennes couches de roulement recouvertes.

Il concerne les structures de types bitumineuses épaisses, à assise traitée aux liants hydrauliques, mixtes et inverses.

Il se traduit par l'apparition dans les bandes de roulement d'ornièrre « à petit rayon » (largeur de l'ordre de 0,80 m) sur une longueur significative (au moins une dizaine de mètres en continu), accompagnée le plus souvent de bourrelets en bord d'ornièrre, parfois d'une fermeture du matériau en fond d'ornièrre (aspect lisse).

Ce désordre n'a pas d'effet sur la durabilité de la structure (au sens patrimonial), mais affecte doublement la sécurité des usagers (à partir de 10 à 15 mm de profondeur d'ornièrre) : d'une part par un effet de guidage ressenti dans la conduite par tous les temps, d'autre part par un risque d'aquaplanage dû à la rétention d'eau dans l'ornièrre par temps de pluie.

8.2 Causes du phénomène

L'ornièrage résulte du comportement thermo-visco-plastique des matériaux bitumineux. Sous l'effet d'une élévation de température (effet thermique), le liant bitumineux se ramollit (effet visqueux), permettant le réarrangement du squelette granulaire du mélange (effet plastique) sous l'effet du pétrissage généré par le passage des essieux lourds ; ce ré-arrangement du mélange consiste généralement en une augmentation de la compacité du mélange, puis en une extrusion du matériau du centre de la bande de roulement vers les côtés. Dès que la température diminue, le bitume se rigidifie, figeant le matériau dans sa nouvelle géométrie.

Le phénomène apparaît lorsque :

- la température ambiante (et donc a fortiori celle du mélange) est élevée (à partir de 35°C voire dès 30°C) ; le phénomène est d'autant plus accentué que la température est élevée, et qu'elle le reste longtemps ;
- la vitesse de sollicitation est plus lente (voie en rampe) ;
- le matériau est soumis à un trafic agressif (trafic poids lourds élevé, canalisé) ;
- les sollicitations de cisaillement sont importantes (giratoire, zones de freinage) ;
- la couche bitumineuse est d'épaisseur suffisante (0,04 m et plus).

L'évolution de l'ornièrre peut se faire :

- soit progressivement, au fil du temps : la cause de cet ornièrage peut alors être recherchée dans la formulation du matériau, probablement inadaptée aux conditions d'usage, ou dans un léger défaut de fabrication (excès de liant, passant à 2 mm élevé i.e. supérieur à 30-32 %, défaut de fines) ;
- soit rapidement : la cause en est alors souvent une période de fortes chaleurs, inhabituelle et durable, qui provoque le réchauffement de la couche sur toute son épaisseur et l'apparition de l'ornièrage par mécanisme visco-plastique dans la masse du matériau, lorsque celui-ci est inadapté à ces sollicitations thermiques (inadéquation de la classe du liant par exemple).

En résumé, les causes de l'ornièrage peuvent être recherchées parmi la liste suivante :

- une période de chaleur inhabituelle pour la région ;
- une inadéquation de la formule du matériau bitumineux aux sollicitations locales (trafic poids lourds, climat usuel, canalisation du trafic, valeur de rampe, zone de fort cisaillement) ;
- un défaut de fabrication, portant sur le choix du grade de bitume, le squelette granulométrique (passant à 2 mm élevé, pourcentage de fines faible) ;
- un défaut de compactage (sous-compactage, provoquant un post-compactage, ou un sur-compactage) ;
- une sollicitation exceptionnelle (augmentation importante et momentanée du trafic) ;
- une pollution exceptionnelle du matériau (par des hydrocarbures, par exemple).

8.3 Détection et traitement

Il est détecté :

- Visuellement, soit par le gestionnaire à l'occasion d'une visite de son itinéraire, ou par plainte des usagers ; dans ce cas, l'ornièrre a atteint une profondeur importante (12 à 15 mm au minimum) ;

- soit lors d'une campagne d'auscultation, auquel cas l'ornière est le plus souvent de faible amplitude (5 à 10 mm).

La solution de réparation à retenir dépend de la cause supposée de l'orniérage, de la vitesse d'évolution de l'ornière et de la couche concernée.

La couche provoquant l'orniérage est :

- soit la couche de roulement ;
- soit la couche de liaison ;
- soit une couche plus profonde, souvent une ancienne couche de roulement rechargée.

Elle est mise en évidence :

- soit par une série de carottes prélevées le long d'un profil en travers (figure 14), les carottages devant être prioritairement réalisés dans le bourrelet de rive, en bande de roulement et en axe de voie ;
- soit par un barreau de chaussée prélevé perpendiculairement à la bande de roulement.

La couche orniérée est celle dont l'épaisseur est plus faible dans la bande de roulement par rapport à son épaisseur relevée hors bande de roulement.

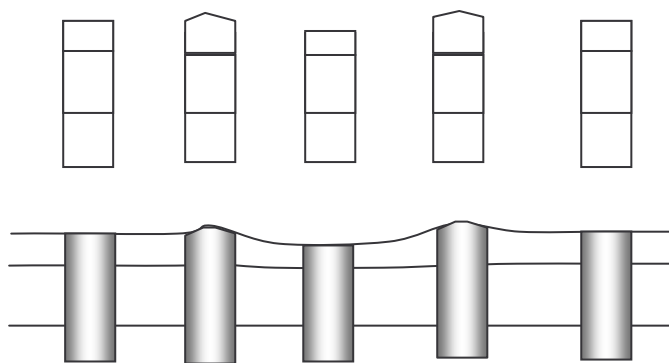


Figure 14 - Détermination de la couche orniérée par carottage

La solution de réparation à mettre en œuvre est proposée dans le tableau 49.

Voie	Cause de l'orniérage					
	Période caniculaire	Formule inadaptée	Défaut de fabrication	Défaut de compactage	Sollicitation exceptionnelle	Pollution
Lente	-	Rechargement ou substitution		Suivi		Substitution
Rapide	Fraisage des bourrelets et restitution de la macrotexture si nécessaire	Substitution du matériau ; thermo-régénération ; thermoreprofilage		Substitution	Fraisage de bourrelets et restitution de la macrotexture si nécessaire	

Tableau 47 - Solution de réparation

9 Dégradations des couches de surface de type arrachement

Ces dégradations n'affectent que la partie supérieure de la structure.

Origine : décohéation des matériaux bitumineux présentant des pourcentages de vides importants et placés dans un environnement humide entre des couches bien moins perméables et soumis à des conditions climatiques difficiles (cycles de gel-dégel très fréquents ...).

De nombreux désordres, du type nid de poule, sont apparus suite au recouvrement de couches de roulement anciennes par des couches minces (après un éventuel fraisage de la couche de surface) sur réseau à fort trafic. Les apparitions des dégradations sont très rapides (quelques heures) et ont toujours lieu en périodes de gel-dégel accompagnées de fortes pluies.

Le premier désordre connu remonte à l'hiver 2002 – 2003.

Ci-dessous, quelques photos illustrant ces désordres :



Voie médiane avec nids de poule



Voie poids lourds avec départs en plaques : pelade

Les investigations menées sur chaussées dégradées montrent que :

- tous les types de structure peuvent être concernés par ces désordres ;
- les couches d'assise ne sont pas à l'origine des dégradations ;
- les couches de roulement sont fréquemment des couches minces ou très minces (BBM ou BBTM). En général, elles ne présentent aucun défaut de cohésion ;
- le point faible se situe entre l'assise de chaussée et la couche de roulement : couche de liaison ou ancienne couche de roulement ayant fait l'objet d'un rechargement présentant des défauts type feuilletage, perte de cohésion ... Les matériaux de cette couche intermédiaire évoluent vers du désenrobage plus ou moins prononcé, en particulier en partie supérieure, entraînant ainsi un décollement de la couche de roulement.



Les carottes extraites montrent la fragilité de cette couche de liaison à l'origine du décollement de la couche de surface.

En général, ces dégradations surviennent après entretien par couche mince sur un support ancien auparavant circulé ou ayant subi une opération de fraisage.

On notera que nos moyens et méthodes d'auscultations ne permettent pas de détecter ces défauts ni de les prévenir dans l'état actuel de nos connaissances. Il conviendra donc d'étudier plus finement ces couches de liaison lors d'études d'entretien, en particulier en augmentant le nombre de carottes et en réalisant des essais pour mieux les caractériser.

10 Défauts de conception et de réalisation les plus fréquents

10.1 Dégradations de chaussée causées par le décalage des zones de stationnement

En général, seules les voies de circulation d'une chaussée sont construites avec une structure dimensionnée pour le trafic PL. Les zones peu ou pas circulées (BAU d'une autoroute, aire de stationnement dans un bourg, ...) sont généralement constituées d'une structure granulaire de faible dimensionnement.

Cependant, le gestionnaire peut être amené à porter la circulation sur cette zone qui, sous l'effet du trafic, se dégrade alors rapidement.

10.1.1 Exemple d'une aire de stationnement d'un bourg qui a été circulée



Conséquence d'une circulation provisoire sur une partie de la chaussée normalement réservée au stationnement (faiblement dimensionnée) : La chaussée présente du faïençage, dégradation caractéristique de fatigue.

10.2 Dégradations de chaussée causées par le décalage des voies de circulation

La construction d'une chaussée doit être effectuée en réalisant une sur-largeur des couches d'assise afin d'éviter les effets de bords dus aux charges à supporter.

Il arrive que pour les anciennes chaussées réalisées en encaissement cette sur-largeur n'existe pas. Il convient donc de s'assurer lors d'un entretien que la largeur de la couche de roulement soit compatible avec la structure en place.

Il arrive également que l'entretien d'une chaussée soit réalisé – de façon involontaire – avec un décalage par rapport à l'ancienne structure (cas sur 2x2 voies lorsque l'entretien comprend le revêtement de BAU).

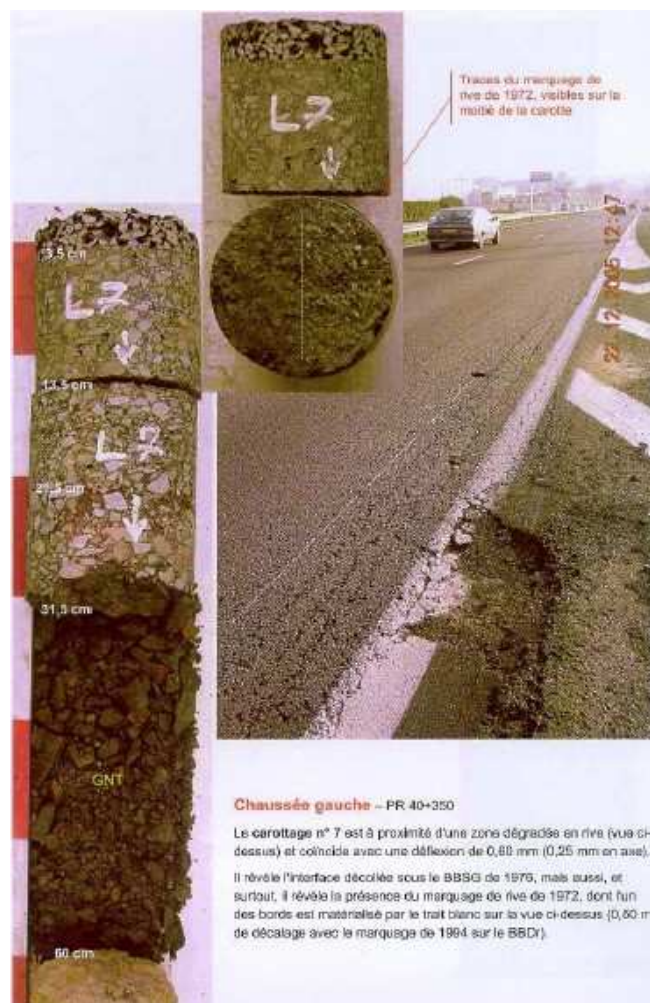
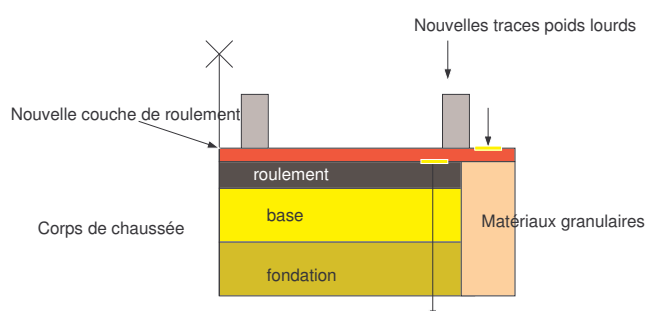
10.2.1 Exemple d'entretien de la couche de roulement d'une route à 2x2 voies



Dans le cadre de son entretien, une nouvelle couche de roulement a été réalisée avec élargissement de la BAU et le marquage au sol s'est trouvé décalé sur la gauche. Au niveau des nouvelles bandes de roulement de la voie rapide, la chaussée s'est rapidement déformée et dégradée à cause des effets de bord.

10.2.2 Exemple d'une chaussée dont le marquage routier a été décalé

Les poids lourds ont circulé sur la partie non structurée de la chaussée, causant des dégradations de fatigue.



10.3 Défauts de réalisation dans les giratoires

Du fait du passage des poids lourds à vitesse réduite et des transferts de charges liés à la configuration des lieux, les giratoires sont des zones particulièrement sollicitées.

Rappelons que leur dimensionnement doit être réalisé selon les préconisations du guide « Conception structurelle d'un giratoire en milieu urbain » (CERTU – janvier 2000), qui retient :

- une majoration de 15 % des épaisseurs des couches d'assises calculées selon le guide de « Conception et de dimensionnement des structures de chaussée » ;
- un coefficient d'agressivité égal à 1 ;
- un risque de 5 % ;
- une couche de roulement ≥ 6 cm (BBSG).

Ces préconisations s'appliquent aussi aux amorces de raccordement au giratoire.

Les principaux désordres constatés interviennent lors de l'aménagement d'anciens carrefours avec conservation partielle de l'ancienne structure non adaptée et mauvaise liaison entre ancienne et nouvelle structure.

10.3.1 Conservation partielle de l'ancienne chaussée sous-dimensionnée lors de l'aménagement d'un nouveau giratoire



La chaussée présente du faïençage avec remontée de fines, dégradation caractéristique d'un désordre d'ordre structurel.

10.3.2 Mauvaise réalisation du joint de mise en œuvre



Le joint de mise en oeuvre s'ouvre et se dégrade sous circulation. La couche de roulement devrait toujours être mise en oeuvre avec deux finisseurs en parallèle afin d'obtenir un joint chaud, bien fermé, qui évite à l'eau de pénétrer dans le corps de chaussée ou être réalisée selon la technique de l'escargot.

10.3.3 Problème de jonction section courante/giratoire



10.3.4 Exemple de surchauffe de l'enrobé à la mise en oeuvre entraînant une fissuration de surface

Dans certains cas particuliers, les conditions de mise en oeuvre des enrobés sont parfois difficiles à cause des contraintes de circulation et les temps d'approvisionnement sur le chantier peuvent être longs. Pour que l'enrobé reste suffisamment chaud et maniable, les centrales peuvent avoir tendance à le surchauffer à la fabrication. Le liant est alors vieilli prématurément, ses caractéristiques de péné-TBA sont modifiées. Après quelque temps, il devient cassant et la couche de roulement peut se fissurer par le haut. Cette pathologie doit être confirmée par des carottes et des essais sur enrobé prélevé sur site.



L'enrobé présente de la fissuration anarchique. Des carottes réalisées sur les fissures (marque jaune) permettent de vérifier que la fissuration provient de la surface.

10.4 Défauts de drainage

L'eau étant, avec le trafic PL, un des principaux facteurs aggravant le vieillissement d'une chaussée, et tout spécialement en période de gel-dégel, il convient de prendre les mesures nécessaires pour que l'eau n'y pénètre pas ou puisse s'en évacuer rapidement. La couche de roulement assure l'étanchéité de la surface, l'assainissement et le drainage permettent à l'eau de s'écouler hors de la chaussée.

D'une manière générale, les accotements doivent être dérasés s'il ne sont pas revêtus ; la profondeur et la pente des fossés doivent permettre d'éviter une contamination par l'eau du corps de chaussée.

Les principaux défauts observés sont du faïençage et une déformation en rive de la chaussée



L'absence de fossé empêche l'eau de s'écouler hors de la chaussée.



Les accotements non dérasés empêchent l'eau de s'écouler hors de la chaussée.

Les chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques en raison de leur mode d'évolution (apparition de fissures transversales) doivent faire l'objet d'un drainage efficace pour évacuer l'eau infiltrée.

Pour ce faire il peut être nécessaire de réaliser des écrans drainants de rives (voir chapitre 5 – § 1.2.).



Cette chaussée hydraulique, réalisée en encaissement, présente de la fissuration transversale. Malgré les réparations, de l'eau et des fines argileuses continuent de remonter à la surface par les fissures qui restent actives. Ces défauts sont causés par l'eau résiduelle qui stagne dans la chaussée, cette dernière n'ayant pas été construite avec un dispositif de drainage efficace. Avant de lancer des travaux de réfection de la voie lente, il conviendra donc de construire des écrans drainants de rive.

10.5 Cas des décaissements

Les décaissements, majoritairement réalisés en agglomération, sont souvent la conséquence de contraintes de seuils.

Il faut être conscient de l'hétérogénéité des structures en place liée à l'évolution du lieu et à la présence de réseaux enterrés (sur lesquels des interventions ont souvent été réalisés après la construction de la chaussée).

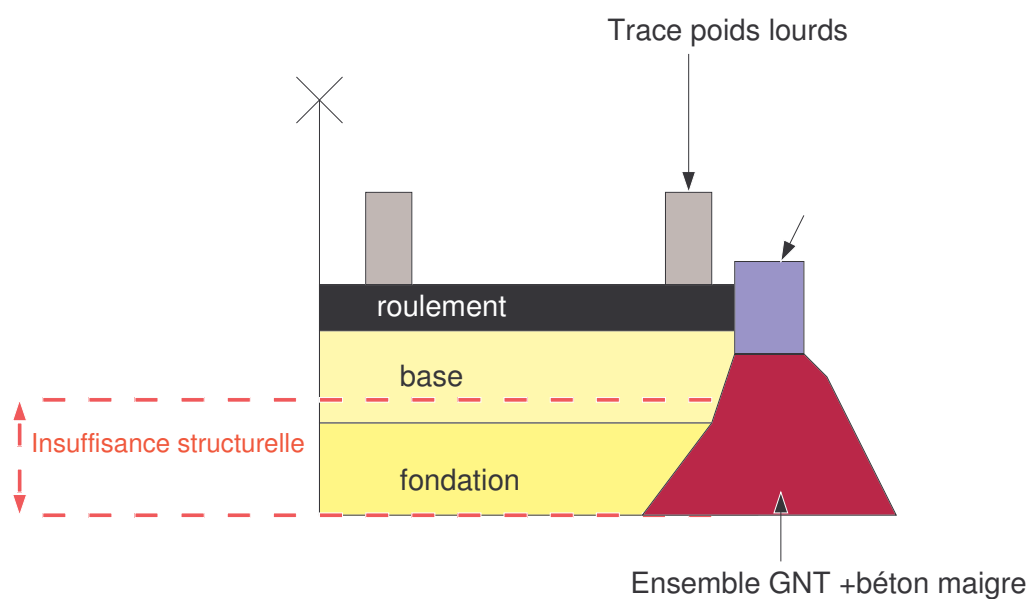
Cette hétérogénéité doit conduire à prévoir des différences de portance (du sol ou de la GNT) logiquement déjà détectées par les mesures de déflexions.

Il faut également tenir compte de l'ancienneté de la structure : certains matériaux ont favorablement évolué dans le temps et supportent parfois mal un remaniement subi par une opération de décaissement. De plus l'intervention d'engins de chantier, parfois conjuguée à des conditions météo défavorables, conduit souvent à décohesionner les matériaux en place.

Il est impératif de prévoir une protection vis à vis de intempéries, un exutoire si nécessaire.



Exemple à ne pas suivre : vue d'un chantier la veille de la mise en oeuvre des enrobés



Il arrive que les entretiens en agglomération soient réalisés en « jouant » sur les contraintes de seuils : la rive est fraisée de manière à conserver la hauteur des bordures et l'axe est rechargé sans fraisage. La conséquence est que la structure n'est jamais réellement « renforcée » en rive malgré des signes de fatigue et la chaussée devient bombée.



Résultat d'une traverse rechargée x fois avec fraisage des rives (rognant peu à peu sur la hauteur de vue des bordures)

10.6 Cas des élargissements sans redans

Des défauts peuvent être observés au niveau du joint d'élargissement.

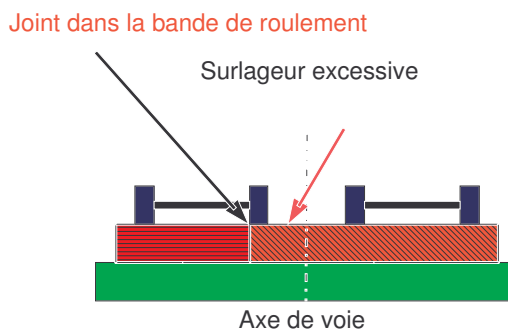


Le changement de structure se matérialise par un joint d'élargissement qui se situe sous la bande de roulement gauche de la nouvelle voie lente. Des déformations ont été relevées au niveau de ce joint. Pour diagnostiquer les désordres, la méthode Radar avec calage des mesures par des carottages semble la plus adaptée. Ainsi, il apparaît que les couches de la nouvelle chaussée ne sont pas construites avec des redans. Le joint, bien qu'il ait été ponté, semble actif et laisse pénétrer l'eau dans le corps de chaussée.

10.7 Joints de mise en oeuvre dans les bandes de roulement

Ce phénomène se rencontre fréquemment lors de travaux réalisés sous alternat.

Lors du premier répandage du finisseur la largeur de mise en œuvre peut être supérieure à celle de la voie et crée un joint dans la bande de roulement de la voie adjacente.



D'un point de vue général, il est préconisé, si les travaux ne peuvent être réalisés en pleine largeur, que le joint se situe dans l'axe de la voie ou au niveau du marquage.

Rappelons qu'il faut au minimum appliquer la technique du joint tiède.

10.8 Empilage de couches – Prise en compte du support

Au cours de sa vie, la chaussée subit souvent une augmentation de trafic nécessitant plusieurs entretiens et parfois un recalibrage.

La solution consistant en des rechargements (ou renforcements) successifs n'est pas forcément la plus adaptée : en effet un sol support peu porteur peut empêcher une bonne mise en œuvre des matériaux (compactage difficile, voire impossible); on multiplie également les risques de non-collage entre couches.

De plus une tendance à élargir la chaussée en rognant sur l'accotement conduit irrémédiablement à des désordres.

Les rechargements successifs conduisent également parfois à un bombement de la chaussée.



Chapitre 4 : Conception des solutions de travaux de renforcement

1 Objectif des travaux

L'objectif de la conception à définir avec le maître d'ouvrage peut être :

- une réhabilitation ou une remise en état d'une chaussée ayant évolué au-delà des seuils admissibles.
- un entretien des caractéristiques de surface sur une chaussée ayant moyennement évolué.

1.1 Réhabilitation ou remise en état d'une chaussée ayant évolué au-delà des seuils admissibles

Les dégradations, nombreuses, concernent la structure et ne permettent pas un entretien durable des seules caractéristiques de surface.

Dans ce cadre, le maître d'ouvrage pourra opter pour une conception au choix :

- soit avec une stratégie d'investissement lourd, caractérisée par une durée longue (15 à 20 ans), un faible risque de dimensionnement et un entretien ultérieur réduit aux seules caractéristiques de surface ;
- soit avec une stratégie d'investissement faible, caractérisée par une durée courte (10 à 12 ans), un risque de dimensionnement élevé et une remise en état des caractéristiques structurelles et de surface à échéance de 10 à 12 ans.

La réhabilitation pourra prendre en compte les risques au « Gel/Dégel » en recherchant :

- soit une protection thermique (pas de fissures de gonflement au gel) et mécanique (pas d'excès de fatigue du fait de la perte de portance au dégel) pour une rigueur d'hivers choisie (décennale ou trentenaire) ;
- soit une protection mécanique avec barrière de dégel pour une rigueur d'hiver choisie.

1.2 Entretien des caractéristiques de surface sur une chaussée ayant moyennement évolué.

Le diagnostic résultant de l'auscultation s'assurera d'un maintien des caractéristiques structurelles résiduelles à un niveau suffisant à échéance de l'entretien suivant des caractéristiques de surface.

Les dégradations concernant la structure sont encore peu nombreuses, inférieures aux seuils admissibles, mais l'évolution est plus rapide que la normale (léger sous-dimensionnement, trafic augmentant plus rapidement que prévu, matériaux de moins bonne qualité, ...).

Dans ce cadre, le maître d'œuvre pourra opter pour une conception répondant aux objectifs suivants :

- travaux limités à un entretien de surface, suivis d'une remise en état lors de l'échéance d'entretien suivant. Il n'y a pas de dimensionnement mécanique ;
- conception du dimensionnement de l'entretien compensant les défauts ou adaptant progressivement la structure à l'objectif initial de durée de service. La vérification du comportement des couches en place est faite avec les hypothèses de conception initiales pour une durée longue (15 à 20 ans) ;
- conception du dimensionnement de l'entretien prenant en compte une modification des conditions d'exploitation de la chaussée (modification du trafic supporté, prolongation de la durée de service).

2 Cahier des charges défini par le gestionnaire

La définition de conception de travaux de réhabilitation ou d'entretien passe par la prise en compte :

- du trafic poids lourds prévisible, MJA après les travaux, taux de croissance, agressivité ;

- de la durée de calcul attendue pour les solutions de travaux ainsi que du risque retenu ;
- de la tenue au gel dégel définie par un indice de gel de référence ou par un niveau de barrière de dégel ;
- des contraintes de seuils :
 - niveau libre : pas de contraintes de seuil ;
 - niveau fixé : nécessité de maintenir le niveau actuel ou de le faire évoluer vers une nouvelle côte (variation positive ou négative) ;
 - niveau borné: l'altimétrie de la chaussée renforcée peut varier à l'intérieur d'une amplitude finie et donnée.
- du profil en travers de la future chaussée (élargissement, épaulement, mise à pente unique...) ;
- de la présence de réseaux (profondeur limite de décaissement) ;
- des techniques de réhabilitation ou d'entretien ;
- des caractéristiques d'usage, uni, adhérence, bruit, couleur ;
- des gênes à l'usager et aux riverains défini par une durée maximale des travaux ;
- de l'impact environnemental des solutions proposées.

3 Méthode de calcul des renforcements

A ce stade, l'étude d'auscultation a permis de poser un diagnostic sur l'état de la chaussée, statuant sur la nécessité de la renforcer.

Deux cas se présentent :

- l'endommagement de certaines couches en place est inférieur à 1, on cherchera à valoriser le capital dommage résiduel de la chaussée en calculant le renforcement selon la loi de Miner de cumul des dommages ;
- l'endommagement des couches en place est supérieur à 1, le renforcement de la chaussée se calcule comme une chaussée neuve, reposant sur le support représenté par tout ou partie de l'ancienne chaussée.

Deux types de renforcement sont à distinguer, qui conditionnent la conduite du calcul :

- la chaussée peut être rechargée sans contrainte de seuils ou de remise à niveau des équipements ;
- la chaussée est soumise à une contrainte de seuil qui nécessite un décaissement (total ou partiel).

Le retraitement en place de la chaussée existante peut également être envisagé lorsque les matériaux du site s'y prêtent.

3.1 Description de la méthode

3.1.1 Hypothèses du maître d'ouvrage

Les hypothèses fixées par le maître d'ouvrage pour sa chaussée future sont listées dans le cahier des charges (cf. chapitre 4 §2). En l'absence de données fournies par le maître d'ouvrage, des hypothèses seront formulées et soumises à son approbation.

3.1.2 Trafic

Les données trafic sont explicitées dans le chapitre 1 §2.2.

3.1.3 Modélisation de la structure en place

Le modèle retenu pour décrire la chaussée en place est celui issu de la modélisation à la date de l'étude d'entretien calée par calcul inverse (cf. chapitre 3).

3.1.4 Typologie des renforcements

Quatre configurations se présentent :

- le rechargement (Figure 15) ;
- le décaissement partiel (Figure 16 et Figure 17) ;
- le décaissement total (Figure 18) ;
- le retraitement en place¹², qui peut s'apparenter aux décaissements partiel ou total.

¹² Guide technique « Retraitement en place à froid des anciennes chaussées » §5.1 - page 14

Ancienne structure	Structure renforcée	Sollicitations dimensionnantes	Epaisseur ; module ; coef. Poisson	Interface
	Couche de surface		H11 ; E11 ; ν 11	Collée
	Couche d'assise	$S_{T12 \text{ inf}}$	H12 ; E12 ; ν 12	Collée ou semi-collée ou décollée
Couche de surface	Couche de surface	$S_{T1 \text{ inf}}$	h1 ; E1 ; ν 1	Collée ou semi-collée ou décollée
Assise traitée	Assise traitée	$S_{T2 \text{ inf}}$	h2 ; E2 ; ν 2	Collée
Grave non traitée	Grave non traitée	$S_{Z3 \text{ sup.}}$	h3 ; E3 ; ν 3	Collée
Sol support	Sol support	$S_{Zn \text{ sup.}}$	hn ; En ; ν n	

Figure 15 - Modélisation d'un rechargement

Ancienne structure	Structure renforcée avec décaissement partiel dans l'assise traitée	Sollicitations dimensionnantes	Epaisseur ; module ; coef. Poisson	Interface
	Couche de surface		H11 ; E11 ; ν 11	Collée
Couche de surface	Couche d'assise	$S_{T12 \text{ inf}}$	H12 ; E12 ; ν 12	Collée ou semi-collée ou décollée
Assise traitée	Assise traitée	$S_{T21 \text{ inf}}$	h21 ; E2 ; ν 2	Collée
Grave non traitée	Grave non traitée	$S_{Z3 \text{ sup.}}$	h3 ; E3 ; ν 3	Collée
Sol support	Sol support	$S_{Zn \text{ sup.}}$	hn ; En ; ν n	

Figure 16 - Modélisation d'un décaissement partiel dans un matériau traité

Ancienne structure	Structure renforcée avec décaissement partiel dans la grave non traitée	Sollicitations dimensionnantes	Epaisseur ; module ; coef. Poisson	Interface
	Couche de surface		H11 ; E11 ; v11	Collée
Couche de surface	Couche d'assise		H12 ; E12 ; v12	
Assise traitée				
Grave non traitée		$S_{T12 \text{ inf}}$		Collée
	Grave non traitée	$S_{Z31 \text{ sup.}}$	h31 ; E31 ; v31	Collée
Sol support	Sol support	$S_{Zn \text{ sup.}}$	hn ; En ; vn	

Figure 17 - Modélisation d'un décaissement partiel dans un matériau non traité

Ancienne structure	Structure renforcée avec décaissement total	Sollicitations dimensionnantes	Epaisseur ; module ; coef. Poisson	Interface
	Couche de surface		H11 ; E11 ; v11	Collée
Couche de surface	Couche d'assise		H12 ; E12 ; v12	
Assise traitée				
Grave non traitée	Couche de réglage ou couche de forme (à définir selon le cas)	$S_{T12 \text{ inf}}$		Collée
Sol support	Sol support	$S_{Zn \text{ sup.}}$	hn ; En ; vn	

Figure 18 - Modélisation d'un décaissement total de l'ancienne chaussée

Nota important : si le diagnostic a conduit à un dommage inférieur à 1 pour certaines couches, on doit s'assurer qu'à la fin de la durée de calcul du renforcement ce dommage soit toujours inférieur à 1. Dans le cas contraire le module de la couche concernée devra, lorsque le dommage atteindra 1, être ramené à sa valeur endommagée conventionnelle.

3.1.5 Sollicitations admissibles dans les différentes couches

La sollicitation admissible retenue pour déterminer l'épaisseur du renforcement dépend de la couche considérée. La démarche de dimensionnement consistera à vérifier :

- la fissuration par fatigue des couches liées, en déformation pour les matériaux bitumineux et en contrainte pour les matériaux traités au liant hydraulique ;
- la ruine par déformation permanente des couches non liées (sol et GNT).

Pour les matériaux bitumineux, le critère de dimensionnement est la déformation horizontale à la base du matériau, ε_t :

$$\varepsilon_{t, adm} = \varepsilon_6 (10^\circ\text{C}, 25 \text{ Hz}) \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \times \sqrt{\frac{E(10^\circ\text{C})}{E(15^\circ\text{C})}} \times kc \times kr \times ks \quad [8]$$

Pour les matériaux traités aux liants hydrauliques et pour le béton de ciment le critère est la contrainte horizontale à la base de la couche, σ_t :

$$\sigma_{t, adm} = \sigma_6 \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \times kc \times kr \times ks \times kd \quad [9]$$

Pour les matériaux non traités, le critère est la déformation verticale à la surface de la couche, ε_z :

$$\varepsilon_{z, adm} = A \times (NE)^{-B} \quad [10]$$

les paramètres A et B sont fonction du type de structure

Dans le cas où ce critère serait celui fixant l'épaisseur de renforcement à mettre en œuvre, la valeur de l'épaisseur de la couche d'assise h_0 du renforcement issue du calcul brut devra être corrigée pour intégrer la dispersion d'épaisseur Sh inhérente à tout chantier, cette épaisseur corrigée est notée h_z .

Par suite, on aura :

$$h_z = h_0 + u \quad \text{si } h_0 \text{ est telle que } h_z \leq 0,10\text{m} ;$$

$$h_z = (h_0 - 2xu) / (1 - 0,3xu) \quad \text{si } h_0 \text{ est telle que } 0,10 \leq h_z \leq 0,15\text{m} ;$$

$$h_z = h_0 + 2,5 \times u \quad \text{si } h_0 \text{ est telle que } 0,15\text{m} \leq h_z.$$

avec u : variable centrée réduite associée au risque r .

avec :

- α : pente de la loi d'évolution des déformations permanentes pour les sols ou les matériaux non traités (- 0,222) ;
- ε_6 : déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion (deux points) de l'éprouvette trapézoïdale est obtenue au bout de 10^6 cycles avec une probabilité de 50%, à 10°C et 25 Hz ($\mu\text{d}\acute{e}\text{f}$) ;
- $\theta_{\text{éq}}$: température équivalente adoptée pour le calcul ($^\circ\text{C}$; 15°C en France métropolitaine) ;
- σ_6 : contrainte pour laquelle la rupture conventionnelle par traction en flexion sur éprouvette à 360 jours est obtenue pour 10^6 cycles (MPa) ;
- A : paramètre de la loi d'évolution des déformations permanentes pour les sols et matériaux non traités
- b : pente de la courbe de fatigue du matériau ;

- c : coefficient qui relie la variation des déformations ou contraintes et la dispersion sur les épaisseurs de mise en œuvre (2 m^{-1} ou $0,02 \text{ cm}^{-1}$) ;
- $E(\theta)$: module d'un matériau bitumineux à la température θ et 10 Hz (essai de flexion deux points) (MPa) ;
- k_c : facteur de calage du matériau ;
- k_d : facteur qui prend en compte la présence des discontinuités et l'effet du gradient de température, pour les couches rigides ;
- k_r : facteur tenant compte de l'approche probabiliste de la méthode rationnelle française (intègre la dispersion sur les résultats en fatigue de laboratoire et sur les épaisseurs de mise en œuvre des matériaux). Il vaut :

$$k_r = 10^{-u \times b \times \sqrt{SN^2 + (c \times Sh / b)^2}}$$

- k_s : facteur dépendant du module de la couche sous-jacente ;
- $NE_{\text{durée de vie}}$: nombre d'essieux équivalents de 130 kN, correspondant à la durée de vie théorique de la chaussée (pour un risque R) ;
- R : risque de rupture de la couche, au terme de sa durée de vie théorique (en %) ;
- SN : écart type des résultats de l'essai de fatigue ;
- Sh : écart type de la dispersion des épaisseurs de mise en œuvre des couches d'assise ;
- u : fractile de la loi de probabilité normale centrée réduite (fonction du risque R de calcul retenu).

3.1.6 Risque de calcul

Le calcul du renforcement se fait en retenant un risque de ruine de la structure à l'issue de sa durée de calcul. En l'absence de spécification, la valeur du fractile u associée au risque est donnée par les relations suivantes (Tableau) :

Tableau 48 - Valeur de fractile (u) du risque à retenir pour le calcul du renforcement

	Valeur de u
Renforcement en GB ou EME	$u = -0,411 \times \ln(\text{MJA PL}) + 0,91$
Renforcement en GH	$u = -0,303 \times \ln(\text{MJA PL}) + 0,164$

Nota : u compris entre $-2,326$ et 0

3.1.7 Choix des couches de surface

L'épaisseur totale équivalente des couches de surface (couche de liaison éventuelle plus couche de roulement¹³) sera choisie en fonction de la classe de trafic et du type de matériau retenu pour le renforcement (Tableau).

Tableau 49 - Epaisseur totale équivalente des couches de surface en fonction de la classe de trafic et du matériau de renforcement

	T4	T3 et T2	T1	T0	TS et TEX
GB	4 cm	6 cm	8 cm	8 cm	8 cm
EME	-	2,5 cm*	2,5 cm*	8 cm	8 cm
GH	6 cm	6 cm	8 cm	10 cm	14 cm
Retraitement en place à froid aux liants hydrocarbonés	ES ou ECF 6 cm**	6 cm	6 cm 8 cm**	-	-
Retraitement en place aux liants hydrauliques	6 cm	6 cm	8 cm	10 cm	14 cm

* Rappelons qu'un BBTM ne permet pas d'améliorer l'uni obtenu sur l'EME.

** Pour une durée de service longue

¹³ Les couches de surface doivent être choisies pour répondre aux exigences d'uni et d'adhérence du maître d'ouvrage (pour le réseau routier national on se réfère aux spécifications des circulaires uni (2000-36) et adhérence (2002-39)).

Pour les renforcements en GB ou EME, on pourra également envisager d'adopter une couche de roulement mince en enduit superficiel d'usure (ESU) ou en enrobé coulé à froid (ECF), et ce jusqu'à des classes de trafic élevé (T1). Ce choix suppose de retenir une technique adaptée au trafic, et de s'assurer que l'uni final de la chaussée, nécessairement moins bon qu'avec un enrobé épais, réponde aux exigences du maître d'ouvrage.

3.1.8 Modélisation du renforcement

La modélisation du renforcement se fait conformément au Guide technique Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussées de 1994, pour une température équivalente de 15°C. Les sollicitations induites dans la chaussée sont calculées pour l'essieu de référence de 130 kN.

L'ancienne chaussée est modélisée conformément au résultat issu du Chapitre 3, § 3.

Le renforcement est modélisé en distinguant la couche de surface, choisie en fonction du cahier des charges du maître d'ouvrage, et la couche d'assise, dont l'épaisseur est l'inconnue du problème.

Le renforcement prend en compte les caractéristiques élastiques standard des matériaux utilisés, ou si elles sont disponibles, des valeurs de module issues d'essais de laboratoire correspondant au matériau réellement utilisé pour le renforcement, pour la compacité attendue sur chantier.

La condition d'interface entre le renforcement et l'ancienne chaussée est fonction du type de structure et de sa pathologie.

Le coefficient de Poisson des matériaux bitumineux et celui des matériaux non traités est pris égal à 0,35. Celui des matériaux traités au liant hydraulique est pris égal à 0,25.

Le calcul est conduit pour différentes épaisseurs de la couche d'assise du renforcement.

3.1.9 Phasage du calcul

Ce calcul se déroule par étapes successives consistant à :

- lister les hypothèses retenues par le maître d'ouvrage pour la chaussée considérée ;
- considérer le modèle de la chaussée existante (obtenu par calcul inverse, cf. chapitre 3) comme support du renforcement ;
- vérifier les critères de dimensionnement suivant le cas de calcul ;

Taux d'endommagement	< 1	≥ 1 et absence de dégradations structurelles	≥ 1 et présence de dégradations structurelles
Trafic cumulé de dimensionnement	$N2 = \frac{n2}{1 - \frac{n1}{N1}}$	D'une manière forfaitaire $\frac{n1}{N1} = 0,9$	n2
Critère de dimensionnement	$\frac{S2}{S1} = \left(\frac{n2}{N1 - n1} \right)^b$	$\frac{S2}{S1} = \left(\frac{n2}{N1 - n1} \right)^b$	S adm = f(n2)
Couches dimensionnantes	Couches de l'ancienne chaussée	Couches de l'ancienne chaussée	Couches du renforcement et les couches de l'ancienne chaussée non liées

Légende :

n1 : nombre d'essieux équivalents qu'a subi la chaussée avant son entretien ;

N1 : nombre d'essieux équivalents correspondant à la durée théorique de la chaussée avant travaux ;

n2 : nombre d'essieux équivalents que subira la chaussée après son entretien ;

N2 : nombre d'essieux équivalents correspondant à la durée théorique de la chaussée après travaux ;

S1 : sollicitation dimensionnante de la chaussée avant entretien ;

S2: sollicitation dimensionnante de la chaussée après renforcement ;

S adm : sollicitation admissible ;

b : pente de la courbe de fatigue du matériau.

Dans le cas où la chaussée existante a connu divers entretiens successifs on calcule le dommage total subit par cette chaussée, puis la valeur de N2 permettant le calcul de la valeur admissible $S_{adm} = f(N2)$

- choisir les couches de surface cf 3.1.7 (épaisseur totale équivalente) et d'assise du renforcement (nature) ;
- calculer les sollicitations induites dans la chaussée renforcée au passage de l'essieu de référence, pour différentes épaisseurs de renforcement ;
- déterminer l'épaisseur solution de l'assise du renforcement ;
- retenir une épaisseur de renforcement, intégrant les épaisseurs nominales des produits de renforcement et les conditions de mise en œuvre.

3.1.10 Epaisseur solution

L'épaisseur de renforcement (couche d'assise et de surface) requise est celle qui permet de vérifier simultanément les critères de fissuration par fatigue du renforcement et celui de déformation permanente du sol support :

- $\varepsilon_t < \varepsilon_t \text{ adm}$ à la base de la couche d'assise du renforcement, si celle-ci est en matériau bitumineux ou $\sigma_t < \sigma_t \text{ adm}$ à la base de la couche d'assise du renforcement, si celle-ci est en matériau traité au liant hydraulique ;
L'épaisseur de renforcement vérifiant ce critère de fissuration par fatigue est notée h_t .
- $\varepsilon_z < \varepsilon_z \text{ adm}$ en surface du sol support ;
L'épaisseur de renforcement vérifiant ce critère de déformation permanent est notée h_z .

L'épaisseur du renforcement est donc : $h_r = \max(h_t ; h_z)$ plus l'épaisseur de la couche de surface.

Nota bene : Il se peut que le calcul ne parvienne pas à justifier la mise en œuvre d'un renforcement, alors que l'état visuel de la chaussée en place nécessite la réalisation de travaux (qui s'apparentent le plus souvent à un entretien de surface). Dans ce cas, le « renforcement » sera choisi en fonction de critères définis en lien avec le maître d'ouvrage, tels que garantir la pérennité de la structure par étanchement de sa surface, régénérer les caractéristiques d'usage (adhérence, uni, lisibilité, confort acoustique...), corriger un défaut manifeste de choix de matériau pour la couche de roulement.

3.2 Spécificités des différentes conceptions

3.2.1 Cas des rechargements

On garde intégralement la chaussée.

3.2.2 Cas des décaissements

Le renforcement de la chaussée par décaissement se calcule comme une chaussée neuve, reposant sur le support qu'est l'ancienne chaussée à laquelle une épaisseur significative a été ôtée par fraisage ; l'épaisseur de fraisage est ajustée par itération afin de coïncider avec celle du renforcement nécessaire.

Le calcul se déroule par étapes successives conformément au cas précédent.

La seule différence porte sur la modélisation de la chaussée existante.

3.2.2.1 Structure en place

Le modèle retenu pour décrire la chaussée en place est élaboré à partir de celui issu de la modélisation par calcul inverse (cf. chapitre 3, §3).

Toutefois, la profondeur du décaissement imposé par le respect des contraintes de seuils est ajustée concomitamment au calcul de l'épaisseur de renforcement requise, par itérations.

De plus, la profondeur de décaissement devra tenir compte des contraintes suivantes :

- les règles de l'art imposent de laisser au moins 4 cm de couche liée après fraisage, sans quoi on ne peut garantir la tenue du fond de forme après fraisage (4 cm en moyenne signifie que l'on a localement moins de 4cm d'épaisseur, et donc que l'arrachement de la fine couche résiduelle est hautement probable) ;

- s'il existe des interfaces décollées à moins de 4 cm sous la profondeur prévue pour le décaissement, alors le fraisage doit se faire jusqu'à cette interface.

3.2.2.2 Modélisation du renforcement

La modélisation du renforcement se fait conformément au Guide technique Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussées, pour une température équivalente de 15°C. Le calcul des sollicitations induites dans la chaussée est fait pour l'essieu de référence de 130 kN.

Le renforcement est modélisé en distinguant la couche de roulement, choisie en fonction du cahier des charges du maître d'ouvrage, et la couche d'assise, dont l'épaisseur est l'inconnue du problème.

Le renforcement prend en compte les caractéristiques élastiques standard des matériaux utilisés, ou si elles sont disponibles, des valeurs de module issues de laboratoire correspondant au matériau réellement utilisé pour le renforcement, pour la compacité attendue sur chantier.

L'ancienne chaussée est modélisée conformément au résultat issu du Chapitre 3, paragraphe 3. Les couches supérieures sont amputées de l'épaisseur nécessaire à la mise en œuvre du renforcement, par itérations.

Selon l'épaisseur nécessaire de renforcement et les règles de fraisage évoquées précédemment (cf. §), trois cas de calcul sont possibles :

- le fraisage de l'ancienne chaussée conduit à laisser plus de 4cm d'enrobé de l'ancienne chaussée : le calcul du renforcement se fait comme indiqué dans le cas d'un rechargement (cf. §) ;
- le fraisage de l'ancienne chaussée conduit à démonter la totalité de l'ancienne chaussée et à faire reposer le renforcement sur le sol en place : le renforcement est calculé comme une chaussée neuve reposant sur le fond de forme assimilé à une arase ; la mise en œuvre d'une couche de forme intercalaire peut s'avérer nécessaire lors de la présence d'un sol sensible à l'eau.
- le fraisage de l'ancienne chaussée conduit à démonter la totalité des couches traitées, et à laisser des matériaux granulaires : le calcul du renforcement se fait comme indiqué dans le cas d'un rechargement (cf. §), avec pour le calcul de la sollicitation admissible par le renforcement, une valeur de k_s adaptée à la valeur de module (E) de la première couche sous-jacente de 0,10m définie lors de la modélisation du diagnostic. En absence d'au moins d'une couche de 0,10 m le module retenu pour le calcul du k_s est celui du sol support.

Afin d'éviter l'effet de discontinuité des valeurs de k_s en fonction du module, cette valeur est prise égale à :

$$k_s = 0,0929 \times \ln (E) + 0,552$$

Nota : k_s compris entre 0,83 et 1

exemple : soit la modélisation de la GNT suivante à la partie inférieure d'une chaussée souple au niveau du décaissement

matériau	Epaisseur en m	Module en MPa
GNT	0,04	216
GNT	0,10	108
GNT	0,10	54
Sol	6,00	27
Substrat	infini	10000

Pour le calcul du k_s , le module à prendre en compte est celui de la 1^{ère} couche de 0.10 m, soit 108 MPa. Sa valeur est égale à :

$$k_s = 0,0929 \times \ln (108) + 0,552 = 0,99$$

3.2.2.3 Epaisseur solution

L'épaisseur du renforcement requise est déterminée selon les mêmes critères que ceux retenus pour un rechargement. L'épaisseur finale doit de plus vérifier que le fraisage ne laissera pas de couche résiduelle d'enrobé mince (moins de 4 cm), ou d'interface décollée à moins de 4cm du fond de fraisage.

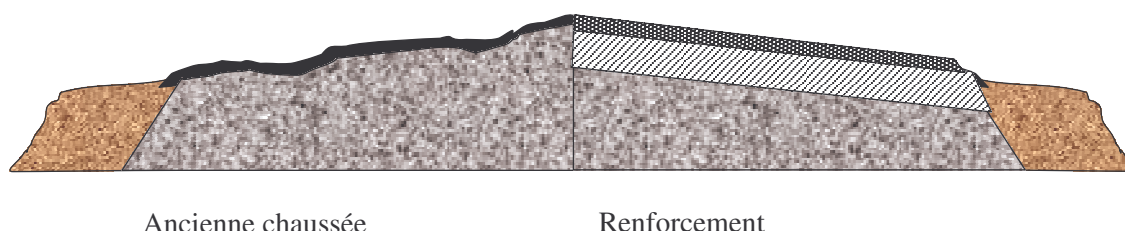


Figure 19 : schéma de principe du renforcement suite à décaissement

3.2.3 Cas des retraitements

Le retraitement de la chaussée en place fait partie des solutions de renforcement à envisager, en se référant au Guide technique *Retraitement en place à froid des anciennes chaussées*.¹⁴

Ce type de solution nécessite une étude qui comporte trois phases principales :

- étude de faisabilité, évaluation du gisement de matériaux sur la section concernée. Les matériaux constitutifs de la chaussée doivent être évalués en terme de qualité et de quantité et éventuellement de localisation, si plusieurs matériaux de nature différente sont trouvés ;
- étude de formulation conduite pour chaque gisement dégagé ;
- dimensionnement.

La technique du retraitement en place permet de limiter l'apport de matériaux à principalement :

- un correcteur granulométrique (si requis par l'étude) ;
- le liant ;
- les matériaux pour les couches de surface et éventuellement la couche de base si de bonnes caractéristiques structurales sont recherchées.

Cette technique est très favorable au développement durable, ses avantages sont :

- la réduction de la quantité de matériaux prélevés en carrière ;
- la moindre circulation de poids lourds pour le transport des matériaux ;
- la réduction de la quantité de CO₂ émis par le transport et la fabrication des matériaux ;
- le moindre endommagement des voies de circulation empruntées par les poids lourds du fait d'un trafic moindre ;
- la ré-homogénéisation de la structure de chaussée transversalement et longitudinalement. Ceci peut revêtir une importance forte dans le cas de chaussées qui ont subi de nombreux travaux de réparation, d'élargissement ;
- la réduction des déchets de chantier ;
- une gêne moindre aux usagers et aux riverains.

3.2.4 Dimensionnement des retraitements à froid aux liants hydrocarbonés

A ce jour le critère de dimensionnement pour cette technique est fondé sur :

¹⁴ Guide technique « Retraitement en place à froid des anciennes chaussées » SETRA juillet 2003

- un interface collé entre le retraitement et son support ;
- un module du matériau traité corrélé avec son pourcentage d'agrégat bitumineux et les résultats de l'étude Duriez (voir annexe 4), le coefficient de Poisson retenu est 0,35 ;
- la déformation verticale du sol support ;
- la prise en compte des couches non endommagées de l'ancienne chaussée conservées.

3.2.5 Dimensionnement des retraitements à froid aux liants hydrauliques

Le critère de dimensionnement pour cette technique est fondé sur :

- un interface collé entre le retraitement et son support ;
- un module du matériau traité déterminé à partir des essais de traction directe ;
- des caractéristiques en fatigue déterminées à partir d'un essai en fatigue ou des relations entre la résistance en traction directe (ou en compression diamétrale) et la contrainte de rupture par traction en flexion sur éprouvette de 360 jours et pour 10^6 cycles (la pente de la courbe de fatigue b dans ce cas est prise égale à $-1/16$) ;
- des dispersions sur les résultats en fatigue (SN) et sur l'épaisseur (SH) fonction de la qualité du retraitement et du matériau (voir annexe 4) ;
- un coefficient de Poisson de 0,25 ;
- un coefficient de calage de 1,6 si l'opération de retraitement ne remanie pas le support, 1,5 dans le cas contraire ;
- du risque de calcul (tableau 48) ;
- la contrainte horizontale à la base de la couche retraitée ;
- la déformation verticale du sol support.

3.2.6 Dimensionnement des retraitements à froid aux liants mixtes

Le critère de dimensionnement pour cette technique est fondé sur :

- un interface collé entre le retraitement et son support ;
- un module du matériau traité déterminé à partir des essais de traction directe ;
- des caractéristiques en fatigue déterminées à partir d'un essai en fatigue ou des relations entre la résistance en traction directe (ou en compression diamétrale) et la contrainte de rupture par traction en flexion sur éprouvette de 360 jours et pour 10^6 cycles (la pente de la courbe de fatigue b dans ce cas est prise égale à $-1/16$) ;
- des dispersions sur les résultats en fatigue (SN) et sur l'épaisseur (SH) fonction de la qualité du retraitement et du matériau (voir annexe 4) ;
- un coefficient de Poisson de 0,25 ;
- un coefficient de calage de 1,6 si l'opération de retraitement ne remanie pas le support, 1,5 dans le cas contraire ;
- du risque de calcul (tableau 48) ;
- la contrainte horizontale à la base de la couche retraitée ;
- la déformation verticale du sol support ;

3.3 Epaulement, élargissement

Le renforcement de la structure peut s'accompagner d'un recalibrage préalable de la chaussée, afin d'améliorer les conditions de circulation et de sécurité. Celui-ci se fait par la construction d'un épaulement ou d'un

élargissement de la chaussée, dans le but d'élargir les voies de circulation ; le renforcement, mis en œuvre par la suite, permet d'homogénéiser la qualité structurelle de l'ensemble de la nouvelle chaussée.

Le choix des matériaux utilisés pour réaliser l'épaulement doit garantir la même qualité structurelle que la chaussée existante, avec si possible la même rigidité, de façon à ce que son comportement dans le temps soit analogue à celui de l'ancienne chaussée. Il peut parfois être nécessaire de réaliser un épaulement plus rigide, mais l'expérience montre que ces épaulements plus rigides sont générateurs de désordres à terme (apparition de fissures longitudinales, voire de tassements différentiels).

Le dimensionnement de cet épaulement se fait selon la méthode de calcul d'une structure de chaussée neuve, fonction de la portance du sol en place, du trafic cumulé devant circuler sur cet épaulement et du matériau retenu. Si les conditions de mise en œuvre ne permettent pas un compactage correct (faible largeur), une majoration de l'épaisseur de 15 % est appliquée sur les couches d'assise. Il doit de plus tenir compte du renforcement calculé sur la base de l'ancienne chaussée (notamment de son apport structurel et de son épaisseur).

Les dispositions constructives invitent à procéder à des redans, systématique dans le cas d'élargissement (cf.§ Ch5 Par 3), et à penser l'ensemble du projet de telle sorte que la limite entre ancienne chaussée et épaulement ne soit pas localisée dans une bande de roulement future. Ainsi, un élargissement d'une ancienne chaussée par les épaulement des deux côtés peut se voir préférer un élargissement d'un seul côté, plus important mais garantissant des conditions de réalisation plus favorables.

Le projet doit également intégrer les dispositifs de drainage et d'assainissement de la chaussée.

4 Renforcement des chaussées souples et des chaussées bitumineuses épaisses

4.1 Cas des rechargements

4.1.1 Modélisation

La modélisation est celle définie lors du diagnostic, le rechargement est collé sur l'ancienne chaussée.

	Couches	Épaisseurs, modules, coefficients de Poisson	Conditions d'interface	Critères dimensionnants
Renforcement	Couche de surface (1)	H1 ; E1 ; ν 1	Collée	
	Couche d'assise (1)	H2 ; E2 ; ν 2	Collée	$\epsilon_{T \text{ inf.}}$ dans le cas de matériaux bitumineux $\sigma_{T \text{ inf.}}$ dans le cas de matériaux traités aux liants hydrauliques
Ancienne chaussée	Matériaux bitumineux	H3 ; E3 ; ν 3= 0,35	Collée ou Semi-collée ou décollée	
			Collée ou Semi-collée ou décollée	
		Hj-1 ; Ej-1 ; ν j-1= 0,35	Collée	
	Grave non traitée	Hj ; Ej ; ν j= 0,35	Collée	
			Collée	
		Hn-1 ; En-1 ; ν n-1= 0,35	Collée	
Sol support	H = 6 m ; En ; ν n = 0,35	Collée	$\epsilon_{V \text{ sup.}}$	
Couche rigide	Infini ; E=10000 MPa ; ν = 0,25			

(1) ces 2 couches peuvent être constituées par une seule couche de roulement

4.1.2 Sollicitations admissibles

Elles sont déterminées comme indiqué dans le paragraphe 3.1.4 pour le matériau de renforcement placé sur l'ancienne chaussée et sur le sol support. **Cas de la courbe en cloche page 60**

Concernant le sol support la valeur de la déformation verticale admissible est donnée par la relation :

$$\epsilon_{z, \text{ adm}} \mu_{\text{déf}} = 0,0225 \times (\text{NE})^{-0,244} \text{ pour les chaussées souples ;}$$

$$\epsilon_{z, \text{ adm}} \mu_{\text{déf}} = 0,012 \times (\text{NE})^{-0,222} \text{ pour les chaussées bitumineuses épaisses.}$$

4.1.3 Epaisseurs et nature des couches de renforcement

Le choix de la couche de surface est fonction de la nature de la couche de base et de la classe de trafic (cf. tableau 49 parag. 3.1.7).

L'épaisseur de renforcement (couche d'assise et de surface) requise est celle :

- qui permet de vérifier simultanément l'élongation ou la contrainte à la base du renforcement et la déformation verticale en surface du sol support (cf. § 3.1.8) ;
- qui répond aux prescriptions du maître d'ouvrage ;
- qui respecte les normes des produits¹⁵.

4.2 Cas des décaissements

4.2.1 Cas 1 : l'ensemble des couches bitumineuses de l'ancienne chaussée sont collées

Dans ces conditions la modélisation est la suivante :

Ancienne chaussée			Renforcement			
Couches	Épaisseurs, modules, coefficients de Poisson	Conditions d'interface	Couches	Épaisseurs, modules, coefficients de Poisson	Conditions d'interface	Critères dimensionnants
Matériaux bitumineux	H1 ; E1 ; ν 1	Collée	Couche de surface (1)	H01 ; E01 ; ν 01	Collée	
		Collée	Couche d'assise (1)	H02 ; E02 ; ν 02	Collée	$\epsilon_{T \text{ inf.}}$ dans le cas de matériaux bitumineux $\sigma_{T \text{ inf.}}$ dans le cas de matériaux traités aux liants hydrauliques
	Hj-1 ; Ej-1 ; ν j-1	Collée	Matériaux bitumineux (AC)	$H \geq 0,04 \text{ m}$; Ej-1 ; ν j-1 (*)	Collée	
Grave non traitée	Hj ; Ej ; ν j	Collée	Grave non traitée	Hj ; Ej ; ν j	Collée	
	Hn-1 ; En-1 ; ν n-1	Collée			Collée	
Sol support	Hn ; En ; ν n	Collée	Sol support	Hn ; En ; ν n	Collée	$\epsilon_{V \text{ sup.}}$
Couche rigide	Infini ; E=10000 MPa ; ν = 0,25		Couche rigide	Infini ; E=10000 MPa ; ν = 0,25		

(*) Dans le cas où l'épaisseur moyenne de matériaux bitumineux de l'ancienne chaussée est inférieure à 4 cm son module sera celui de la grave non traitée sous jacente.

4.2.2 Cas 2 : les couches bitumineuses de l'ancienne chaussée ne sont pas toutes collées

Ainsi s'il existe des interfaces décollées à moins de 4 cm sous la profondeur prévue pour le décaissement, alors le fraisage doit se faire jusqu'à un centimètre sous cette interface.

¹⁵ NF P 98-150-1 de janv. 2008 annexe A

4.3 Cas des retraitements

Ce cas est similaire à un décaissement

4.4 Exemple de conception de chaussée bitumineuse épaisse

Nous reprenons le cas décrit dans le chapitre 7.8

4.4.1 Données

4.4.1.1 Modélisation de la structure en place à la date de l'étude d'entretien

Nature	Épais. (m)	Etat des matériaux	Interface	Module (MPa)
BBTM	0,024	Fis	Collé	2000
BBM	0,036	Fis	Collé	2000
BBME	0,038	Fis	Collé	2000
BBSG	0,073	Fis	Décollé	2000
GB 2	0,126	Fis	Collé	2000
GNT3	0,05		Collé	600
GNT2	0,10		Collé	544
GNT1	0,10		Collé	272
Sol classe GTR D	6,00		Collé	136
Massif rigide	Semi infini			10000

4.4.1.2 Données du maître d'ouvrage

MJA 2006 : 1734 PL/J/sur la voie la plus chargée ; taux de progression annuel : 3 % géométrique ; CAM : 0,8 pour les matériaux bitumineux (réseau structurant), 1 pour le sol support ;

Année des travaux : 2008

Durée de calcul attendue pour les solutions de travaux : 20 ans ; risque retenu : 1,5 %

Trafic en 2008 : $1734 \times 1,03^{2008-2006} = 1840 \text{ PL/j/voie}$

Nombre cumulé d'essieux équivalents en 2028 :

$$TC_{Eq} = 365 \times 1 \times 1840 \times \left[(1 + 0,03)^{20} - 1 \right] / 0,03 = 18 \cdot 10^6 \text{ pour un CAM de 1}$$

$$TC_{Eq} = 365 \times 0,8 \times 1840 \times \left[(1 + 0,03)^{20} - 1 \right] / 0,03 = 14,4 \cdot 10^6 \text{ pour un CAM de 0,8}$$

Tenue au gel dégel définie pour un indice de gel de référence de :

- Contraintes de seuils, 2 cas examinés :
 - niveau libre : pas de contraintes de seuil ;
 - niveau fixé : nécessité de maintenir le niveau actuel.
- Techniques de réhabilitation ou d'entretien : BBSG ; GB3 ; EME2.

4.4.2 Sollicitations admissibles dans les matériaux

Au niveau du sol support

$$\varepsilon_{z, adm} \mu_{\text{déf}} = 0,012 \times (18.10^6)^{-0,222} = 294.10^{-6}$$

A la base des matériaux bitumineux (application de la formule [8])

$$\text{BBSG} : \varepsilon_{t, adm} = 56,9.10^{-6}; \text{GB3} : \varepsilon_{t, adm} = 57,5.10^{-6}; \text{EME2} : \varepsilon_{t, adm} = 64,2.10^{-6}$$

4.4.3 Modélisation du Rechargement

Nature	Épais. (m)	Interface	Module (MPa)	Coef. Poisson
BBSG	Var.	Collé	5400	0,35
BBTM	0,024	Collé	2000	0,35
BBM	0,036	Collé	2000	0,35
BBME	0,038	Collé	2000	0,35
BBSG	0,073	Décollé	2000	0,35
GB 2	0,126	Collé	2000	0,35
GNT3	0,05	Collé	600	0,35
GNT2	0,10	Collé	544	0,35
GNT1	0,10	Collé	272	0,35
Sol classe GTR D	6,00	Collé	136	0,35
Massif rigide	Semi infini		10000	0,35

Le critère dimensionnant est la déformation sur le sol support qui est vérifiée pour une épaisseur de BBSG de 7 cm.

4.4.4 Modélisation du décaissement partiel

Eu égard à la classe de trafic T0, l'épaisseur de la couche de surface sur la GB3 ou l'EME2 doit être égale 8 cm.

Technique GB3

Nature	Épais. (m)	Interface	Module (MPa)	Coef. Poisson
BBSG	0,08	Collé	5400	0,35
GB3	H2	Collé	9300	0,35
BBSG	0,171 – 0,08 - H2	Décollé	2000	0,35
GB 2	0,126	Collé	2000	0,35
GNT3	0,05	Collé	600	0,35
GNT2	0,10	Collé	544	0,35
GNT1	0,10	Collé	272	0,35
Sol classe GTR D	6,00	Collé	136	0,35
Massif rigide	Semi infini		10000	0,35

Le critère dimensionnant est la déformation horizontale à la base de la GB3 qui n'est pas vérifiée pour une épaisseur de GB3 < 0,171 - 0,08 m, en raison du maintien de l'interface décollée. Par contre, le critère est vérifié pour une épaisseur de GB3 d'au moins 0,091 m placée sur la GB2 en raison de la suppression de l'interface décollée suite au fraisage ($\varepsilon_t = 53,5.10^{-6}$).

Compte tenu des dispersions d'épaisseurs au niveau de l'interface décollée, le fraisage sera réalisé à la profondeur maximale de cette interface détectée par les carottages et validée visuellement sur chantier. Dans notre cas, la carotte 4 révèle un décollement à 18,5cm de profondeur.

Ainsi la solution sera :

Fraisage sur 19 cm, application d'une couche d'accrochage (CA), puis 11 cm GB3 0/20, puis CA, puis 8 cm de couche de surface (6cm BBSG 3 0/10 + BBTM par exemple).

Technique EME2

Nature	Épais. (m)	Interface	Module (MPa)	Coef. Poisson
BBSG	0,08	Collé	5400	0,35
EME2	H2	Collé	14000	0,35
BBSG	0,171 – 0,08 - H2	Décollé	2000	0,35
GB 2	0,126	Collé	2000	0,35
GNT3	0,05	Collé	600	0,35
GNT2	0,10	Collé	544	0,35
GNT1	0,10	Collé	272	0,35
Sol classe GTR D	6,00	Collé	136	0,35
Massif rigide	Semi infini		10000	0,35

Le critère dimensionnant est la déformation horizontale à la base de l'EME2 qui n'est vérifiée pour une épaisseur d'EME2 < 0,171 - 0,08 m (interface décollé). Mais qui est vérifié pour une épaisseur de EME2 de 0,091 m placée sur la GB2 interface collé ($\epsilon_t = 48,6 \cdot 10^{-6}$).

Compte tenu des dispersions d'épaisseurs au niveau de l'interface décollé le fraisage sera réalisé à la profondeur moyenne de cet interface plus 4 cm.

Ainsi la solution sera :

Fraisage sur 21 cm, application d'une couche d'accrochage (CA), puis 13 cm EME2 0/20, puis CA, puis 8 cm BBSG 3 0/10

4.4.5 Solutions retenues

Dans le cas d'un rechargement la solution est 7 cm BBSG 3 0/10 EB10 roul

Dans le cas d'un décaissement partiel qui permet de garder le même niveau la solution est un fraisage à 21 cm et l'application de 13 cm de GB3 plus économique en liant bitumineux que l'EME2.

5 Renforcement des chaussées à structures inverses

5.1 Cas des rechargements

5.1.1 Modélisation

La modélisation est celle définie lors du diagnostic, le rechargement est collé sur l'ancienne chaussée.

	Couches	Épaisseurs, modules, coefficients de Poisson	Conditions d'interface	Critères dimensionnants
Renforcement	Couche de surface (1)	H1 ; E1 ; ν 1	Collée	
	Couche d'assise (1)	H2 ; E2 ; ν 2	Collée	$\epsilon_{T \text{ inf.}}$ dans le cas de matériaux bitumineux
Ancienne chaussée	Matériaux bitumineux	H3 ; E3 ; ν 3	Collée ou Semi-collée ou décollée	
			Collée ou Semi-collée ou décollée	
		Hj-1 ; Ej-1 ; ν j-1	Collée	
	Grave non traitée	Hj ; Ej ; ν j	Collée	$\epsilon_{V \text{ sup.}}$
	Grave traitée aux liants hydrauliques	Hj+1 ; Ej+1 ; ν j+1	Collée ou Semi-collée ou décollée	$\sigma_{T \text{ j+1 inf.}}$
			Collée ou Semi-collée ou décollée	$\sigma_{T \text{ inf.}}$
		Hn-1 ; En-1 ; ν n-1	Collée	$\sigma_{T \text{ n-1 inf.}}$
	Sol support	Hn ; En ; ν n	Collée	$\epsilon_{V \text{ sup.}}$
Couche rigide	Infini ; E=10000 MPa ; $\nu=0,25$			

(1) ces 2 couches peuvent être constituées par une seule couche de roulement

nota important : dans le cas où le diagnostic révèle un problème de drainage de la couche de grave non traitée, les travaux de renforcement devront être précédés par ceux résolvant les infiltrations d'eau ainsi que leurs évacuations.

Dans le cas où la grave non traitée a une forte teneur en fines (> 10 %) il est nécessaire de la remplacer par une grave non traitée conforme ou par un matériau insensible à l'eau, celui-ci pouvant être élaboré à partir d'un retraitement à froid aux liants hydrocarbonés.

5.1.2 Sollicitations admissibles

Elles sont déterminées comme indiqué dans le paragraphe 3.1.4 pour le matériau de renforcement placé sur l'ancienne chaussée, pour la grave non traitée (de la structure inverse) et sur le sol support.

Concernant la grave non traitée et le sol support les valeurs de déformations verticales admissibles sont données par les relations :

$$\varepsilon_{z, adm} \mu_{d\acute{e}f} (GNT) = 1,2 \times 0,012 \times (NE)^{-0,244}$$

$$\varepsilon_{z, adm} \mu_{d\acute{e}f} (sol) = 0,012 \times (NE)^{-0,244}$$

Au niveau de la grave traitée aux liants hydrauliques, dans le cas où celle-ci est en bon état et présente un dommage inférieur à 1 au moment des travaux de renforcement, on vérifie que son dommage reste inférieur à 1 (application de la loi des cumuls des dommages).

5.1.3 Epaisseurs et nature des couches de renforcement

Lors de l'application d'une couche de base la couche de surface est fonction de sa nature et de la classe de trafic (cf. parag. 3.1.6).

L'épaisseur de renforcement (couche d'assise et de surface) requise est celle :

- qui permet de vérifier simultanément l'élongation à la base du renforcement, les déformations verticales de la grave non traitée et du sol support (cf. § 3.1.8), et les contraintes dans la grave traitée aux liants hydrauliques ;
- qui répond aux prescriptions du maître d'ouvrage ;
- qui respecte les normes des produits¹⁶.

5.2 Cas des décaissements

5.3 Cas des retraitements

¹⁶ NF P 98-150-1 de janv. 2008 annexe A

6 Renforcement des structures à assise traitée aux liants hydrauliques (LG PB)

6.1 Cas des rechargements

La modélisation est celle définie lors du diagnostic, le rechargement est semi-collé sur l'ancienne chaussée.

	Couches	Épaisseurs, modules, coefficients de Poisson	Conditions d'interface	Critères dimensionnants
Renforcement	Couche de surface (1)	H1 ; E1 ; ν 1	Collée	
	Couche d'assise (1)	H2 ; E2 ; ν 2	Semi collée (2)	$\epsilon_{T \text{ inf.}}$ dans le cas de matériaux bitumineux $\sigma_{T \text{ inf.}}$ dans le cas de matériaux traités aux liants hydrauliques
Ancienne chaussée	Matériaux bitumineux	H3 ; E3 ; ν 3	Collée ou Semi-collée ou décollée	
			Collée ou Semi-collée ou décollée	
		Hj-1 ; Ej-1 ; ν j-1	Collée ou Semi-collée ou décollée	
	Grave traitée aux liants hydrauliques	Hj ; Ej ; ν j	Collée ou Semi-collée ou décollée	
			Collée ou Semi-collée ou décollée	
		Hi-1 ; Ei-1 ; ν i-1	Collée	
	Grave non traitée	Hi ; Ei ; ν i	Collée	
		Hn-1 ; En-1 ; ν n-1	Collée	
	Sol support	Hn ; En ; ν n	Collée	$\epsilon_{V \text{ sup.}}$
	Couche rigide	Infini ; E=10000 MPa ; $\nu=0,25$		

(1) ces 2 couches peuvent être constituées par une seule couche de roulement

CAS DES RECHARGEMENTS

L'interface ancienne chaussée/rechargement est considérée semi-collée.

Cas 1 : Dommage < 1

Le dimensionnement du rechargement s'effectue de manière classique : on détermine l'épaisseur à mettre en œuvre afin de vérifier ϵ_{st} ou σ_t à la base des couches de rechargement < aux valeurs admissibles et σ_t à la base de la couche d'assise MTLH de l'ancienne chaussée.

De même pour ϵ_{sz} au sommet du sol support.

Critères dimensionnants :

ϵ_t ou σ_t à la base des couches de rechargement

σ_t à la base des couches de MTLH de l'ancienne chaussée

ϵ_z au sommet du sol support et au sommet des couches non liées

Cas 2 : Dommage > ou = 1

Cas 2.1 : incohérence entre la valeur de dommage et l'état résiduel

Le rechargement sera constitué uniquement de couches de surface : liaison + roulement dont l'épaisseur est déterminée de la manière suivante :

- calculs itératifs jusqu'à obtention de l'épaisseur E_p permettant de vérifier l'inégalité suivante :

$$\epsilon_t < \epsilon_{tad}$$

- vérifier que l'épaisseur déterminée remplit les critères suivants : (cf ERASMUS)

Proposition 1 :

si $dpic/dmilieu$ de dalle > 1.5 => E_p mini (cm) = $dpic$ (1/100 mm)/10

si FT2 ou FT3 => E_p mini = f (trafic) – cf analyse ERASMUS DE B. BRUSLEE

OU (A DISCUTER)

Proposition 2 :

Si $dc < 19/100$ => E_p mini = 6 cm

Si dc entre 20 et 29/100 => E_p mini = 8 cm

Si dc entre 30 et 44/100 => E_p mini = 10 cm

Si $dc > ou = 45/100$ => E_p mini = 12 cm

- Si ce n'est pas le cas, retenir Max (Ep mini) avec la proposition 1 et Ep mini avec la proposition 2.

Cas 2.2 : cohérence entre la valeur de dommage et l'état résiduel

Le dimensionnement s'effectue de manière itérative en déterminant, à priori avec les données de trafic l'épaisseur et la nature des couches de surface, et en faisant varier l'épaisseur de la couche de base en matériaux bitumineux ou hydrauliques.

Critères dimensionnants :

\mathcal{E}_t ou σ_t à la base des couches de rechargement

\mathcal{E}_z au sommet du sol support et au sommet des couches non liées

CAS DES DECAISSEMENTS

L'interface ancienne chaussée décaissée/renforcement est considérée semi-collée.

A noter que le décaissement sera ajusté afin de ne pas laisser moins de 4 cm de la couche sous-jacente au renforcement.

Dans chaque cas, l'épaisseur totale de matériaux bitumineux devra être supérieure ou égale aux épaisseurs spécifiées dans le catalogue des structures de 1998 et dépendant du trafic.

Cas 1 : Dommage < 1

Le dimensionnement du renforcement s'effectue de manière classique : on détermine l'épaisseur à mettre en œuvre afin de vérifier Epsit ou sigmat à la base des couches de renforcement < aux valeurs admissibles et sigmat à la base de la couche d'assise MTLH de l'ancienne chaussée.

De même pour Epsz au sommet du sol support.

Critères dimensionnants :

\mathcal{E}_t ou σ_t à la base des couches de renforcement

σ_t à la base des couches de MTLH de l'ancienne chaussée

\mathcal{E}_z au sommet du sol support et au sommet des couches non liées

Cas 2 : Dommage > ou = 1

Cas 2.1 : incohérence entre la valeur de dommage et l'état résiduel

Le renforcement sera constitué uniquement de couches de surface : liaison + roulement dont l'épaisseur est déterminée de la manière suivante :

- calculs itératifs jusqu'à obtention de l'épaisseur Ep permettant de vérifier l'inégalité suivante :

$$\mathcal{E}_t < \mathcal{E}_{tad}$$

- vérifier que l'épaisseur déterminée remplit les critères suivants : (cf ERASMUS)

Proposition 1 :

si dpic/dmilieu de dalle > 1.5 => Ep mini (cm) = dpic (1/100 mm)/10

si FT2 ou FT3 => Ep mini = f (trafic) – cf analyse ERASMUS DE B. BRUSLEE

Proposition 2 :

Si dc < 19/100 => Ep mini = 6 cm

Si d_c entre 20 et 29/100 => E_p mini = 8 cm

Si d_c entre 30 et 44/100 => E_p mini = 10 cm

Si $d_c > \text{ou} = 45/100$ => E_p mini = 12 cm

- Si ce n'est pas le cas, retenir Max (E_p mini) avec la proposition 1 et E_p mini avec la proposition 2.

Cas 2.2 : cohérence entre la valeur de dommage et l'état résiduel

Le dimensionnement s'effectue de manière itérative en déterminant, à priori avec les données de trafic l'épaisseur et la nature des couches de surface, et en faisant varier l'épaisseur de la couche de base en matériaux bitumineux ou hydrauliques. Le point de départ du calcul itératif pourra être fixé en s'appuyant sur les structures types des catalogues en vigueur.

Critères dimensionnants :

\mathcal{E}_t ou σ_t à la base des couches de renforcement

\mathcal{E}_z au sommet du sol support et au sommet des couches non liées

6.2 Cas des décaissements

6.3 Cas des retraitements

7 Renforcement des structures mixtes (LG PB)

7.1 Cas des rechargements

La modélisation est celle définie lors du diagnostic, le rechargement est collé sur l'ancienne chaussée.

	Couches	Épaisseurs, modules, coefficients de Poisson	Conditions d'interface	Critères dimensionnants
Renforcement	Couche de surface (1)	H1 ; E1 ; ν 1	Collée	
	Couche d'assise (1)	H2 ; E2 ; ν 2	Collée ou semi collée	$\epsilon_{T \text{ inf.}}$ dans le cas de matériaux bitumineux $\sigma_{T \text{ inf.}}$ dans le cas de matériaux traités aux liants hydrauliques
Ancienne chaussée	Matériaux bitumineux	H3 ; E3 ; ν 3	Collée ou Semi-collée ou décollée	
			Collée ou Semi-collée ou décollée	
		Hj-1 ; Ej-1 ; ν j-1	Collée ou Semi-collée ou décollée	
	Grave traitée aux liants hydrauliques	Hj ; Ej ; ν j	Collée ou Semi-collée ou décollée	
			Collée ou Semi-collée ou décollée	
		Hi-1 ; Ei-1 ; ν i-1	Collée	
	Grave non traitée	Hi ; Ei ; ν i	Collée	
		Hn-1 ; En-1 ; ν n-1	Collée	
Sol support	Hn ; En ; ν n	Collée	$\epsilon_{V \text{ sup.}}$	
	Couche rigide	Infini ; E=10000 MPa ; $\nu=0,25$		

(1) ces 2 couches peuvent être constituées par une seule couche de roulement

7.2 Cas des décaissements

7.3 Cas des retraitements

8 Vérification au gel - dégel des renforcements (HO)

8.1 Principe

Le principe de la démarche est décrit dans le Guide technique Conception et dimensionnement des structures de chaussées ([1]).

La vérification au gel/dégel d'une chaussée renforcée consiste à comparer :

- l'indice de gel atmosphérique qui caractérise l'hiver dont on souhaite protéger la chaussée et choisi comme référence, appelé indice de référence IR,
- et l'indice de gel atmosphérique que peut supporter la chaussée renforcée, appelé indice admissible IA, fonction du sol support, de l'ancienne chaussée et du renforcement.

Selon l'importance attachée à la continuité du service de la route, deux options sont envisageables :

- on conçoit le renforcement de la chaussée pour que l'indice de gel admissible IA de la chaussée renforcée soit supérieur à l'indice de gel de référence IR ;
- on accepte que l'inégalité $IA > IR$ ne soit pas assurée, auquel cas on pourra être conduit à la pose de barrières de dégel pour préserver la chaussée lors du dégel, dès que l'indice de gel de l'hiver en cours aura dépassé IA.

8.2 Choix de l'hiver de référence

L'hiver de référence est celui contre lequel on souhaite protéger la chaussée renforcée.

Son choix est lié à la politique du maître d'ouvrage adoptée pour son réseau. De ce choix dépend la fréquence de poses éventuelles de barrières de dégel, donc d'interruption de la circulation sur son réseau.

On considère habituellement deux situations pouvant être choisies comme référence :

- l'hiver exceptionnel, qui est en un lieu donné le plus rigoureux des hivers survenus sur la période 1951-1996 ;
- l'hiver rigoureux non exceptionnel, qui est en un lieu donné l'hiver décennal sur la période 1951-1996.

En pratique, l'indice de gel de l'hiver rigoureux non exceptionnel est déterminé comme étant la $n^{\text{ème}}$ plus forte valeur d'indice de gel rencontrée pendant la période 1951-1997 avec :

- $n = (\text{nombre d'années pour lesquelles on dispose de valeurs d'indices de gel}) / 10$

L'annexe X fournit les indices de gel des hivers exceptionnels et rigoureux non exceptionnels déterminés pour les principales stations météorologiques françaises sur la période 1951-1997.

Ces valeurs caractérisent la station météorologique elle-même et ne sont pas toujours représentatives de l'ensemble d'un département (notamment en zone montagneuse). Pour déterminer l'indice de gel à retenir pour un projet éloigné d'une station météorologique principale, on recueillera les données disponibles auprès des postes climatologiques les plus proches du projet et on les exploitera conformément aux règles énoncées ci-dessus.

8.3 Détermination de l'indice de gel admissible IA

La détermination de l'indice de gel admissible IA s'effectue conformément à la méthode décrite dans le Guide technique Conception et dimensionnement des structures de chaussées.

La particularité en est que dans le cas des renforcements, l'ancienne chaussée est assimilée à la plate-forme support de chaussée et requiert une analyse préalable.

La méthode de calcul de IA consiste donc dans un premier temps à apprécier le comportement au gel/dégel de l'ancienne chaussée, puis à déterminer la protection apportée par le renforcement.

Cette approche permettra de déterminer successivement :

- la sensibilité au gel du sol support Qg ;
- la protection thermique traduite en quantité de gel Qng apportée par les matériaux non gélifs de l'ancienne chaussée (couche de forme éventuelle et structure de chaussée) ;
- la composante liée à la résistance mécanique du renforcement Qm ;
- la protection thermique apportée par les couches de renforcement ;
- la valeur de l'indice de gel admissible IA.

8.3.1 Comportement au gel/dégel de l'ancienne chaussée

Le comportement au gel de l'ancienne chaussée peut être appréhendé à partir d'éléments divers provenant :

- des sondages et carottages réalisés dans l'ancienne chaussée (complétés éventuellement par les informations provenant d'une banque de données routières, données à valider systématiquement), permettant de déterminer la nature et l'épaisseur des couches constitutives de la chaussée existante ;
- éventuellement, du comportement observé (ou signalé) de la chaussée existante au dégel au cours des hivers passés.

Cette analyse qualitative permet :

- dans le meilleur des cas d'estimer une valeur d'indice de gel admissible de l'ancienne chaussée IAa et par suite une quantité de gel admissible en surface de l'ancienne chaussée ($Q_{sa} = \text{rac}((IAa-10)*0,7)$) ;
- d'apprécier la sensibilité au gel des différentes couches constitutives de l'ancienne chaussée, et de proposer un découpage de l'ancienne chaussée en couches de même classe de sensibilité au gel.

Remarque : on notera que dans le cas où l'ancienne chaussée a subi des désordres dus au gel/dégel, il est opportun de vérifier son comportement au gel/dégel en poursuivant la dé-marche proposée ici pour la seule ancienne chaussée (sans renforcement). Ceci devrait permettre notamment d'apprécier la sensibilité au gel du sol support (valeur de Qg).

8.3.1.1 Sensibilité au gel du sol support Qg

La sensibilité au gel des matériaux constitutifs des différentes couches de l'ancienne chaussées est appréciée en laboratoire par l'essai de gonflement au gel (NF P 98-234-2). La valeur de la pente de la courbe de gonflement détermine la classe de sensibilité au gel (tableau 52).

A défaut de disposer d'essai de gonflement, on pourra se reporter au tableau 53, moyennant une classification GTR préalable du matériau. La valeur de la pente de gonflement à retenir est alors de 0,4 mm/rac(°C.xh) pour un matériau classé SGp et de 1,5 mm/rac(°C.xh) pour un matériau classé SGt.

A défaut d'informations précises sur le matériau, celui-ci sera supposé très gélif ($p=1,5 \text{ mm/rac}(^{\circ}\text{C}\times\text{h})$).

Tableau 50 - Classes de sensibilité au gel

Pente de l'essai de gonflement (mm/(°C.h) ^{1/2})	0,05		0,4
Classes de sensibilité au gel des matériaux	SGn (non gélifs)	SGp (peu gélifs)	SGt (très gélifs)

Tableau 51 - Classes indicatives de sensibilité au gel

(tableau annexe 3 de la notice d'utilisation du Catalogue 98)

Tableau 7 - Classes indicatives de sensibilité au gel

Classification géotechnique du sol ou matériau, non traité	Classe de sensibilité au gel pouvant être adoptée en l'absence d'essai de gonflement
matériaux dont le passant à 80mm est <3% (comprend une partie des matériaux D)	SGn
A3 ,A4 , B1	SGp
A1 , A2 , B2 , B3 , B5 , B6 , R1	SGt

Il n'est pas possible de se prononcer sur les matériaux ne figurant pas dans le tableau ci-dessus en l'état actuel des connaissances. Pour ces matériaux, un essai de gonflement est indispensable.

8.3.1.2 Découpage de l'ancienne chaussée

Une fois déterminée la sensibilité au gel des matériaux constitutifs de l'ancienne chaussée, celle-ci est découpée en couches de même classe de sensibilité au gel, la sensibilité croissant avec la profondeur. Ceci est obtenu en assimilant :

- à des matériaux peu gélifs (SGp) les matériaux non gélifs situés sous une couche peu gélive ;
- à des matériaux très gélifs (SGt) les matériaux situés sous une couche très gélive.

On est ainsi toujours ramené à l'un des trois schémas suivants :

Figure 20 - Découpage de l'ancienne chaussée en couches de même classe de sensibilité au gel

Cas 1 Cas 2 Cas 3

(à faire : figure habituelle)

Dans le cas 1, il n'y a pas de problème de tenue au gel/dégel.

Dans le cas 2, la quantité de gel Q_g admissible en surface du matériau gélif est obtenue à partir de la pente à l'essai de gonflement p de ce matériau :

$$Q_g = \begin{cases} \max(4 ; 1/p) & \text{si } p \leq 1 \text{ mm/rac}(\text{°C}\cdot\text{h}) \\ 0 & \text{si } p > 1 \text{ mm/rac}(\text{°C}\cdot\text{h}) \end{cases}$$

Dans le cas 3, on détermine la quantité de gel admissible en surface de la couche de matériau peu gélif comme suit.

(à faire : commentaire habituel avec Q_g fonction de l'épaisseur de matériaux peu gélifs).

La protection thermique apportée par les couches non gélives de l'ancienne chaussée sera prise en compte au même titre que celle apportée par le renforcement (cf. 3.2).

8.3.2 Protection apportée par le renforcement

Le renforcement participe à la protection thermique du sol support gélif de par son épaisseur et la nature des matériaux qui le constitue.

Il en est de même pour les couches non gélives de l'ancienne chaussée.

Par suite, la prise en compte de la protection thermique apportée par les couches de matériaux non gélifs du renforcement et de l'ancienne chaussée se fait en déterminant la quantité de gel en surface du renforcement conduisant à une quantité de gel transmise à la base des couches non gélives égale à Q_g .

Ce calcul se fait :

- soit par calcul à l'aide d'un modèle (Fourier) thermique de propagation du gel de la surface vers le sol gélif ;
- soit par calculs simplifiés.

Pour le calcul à l'aide du modèle de Fourier, on s'en réfèrera à la méthodologie décrite dans le Guide technique Conception et dimensionnement des chaussées (partie VI, chapitre 5).

Pour un calcul simplifié, la valeur de Q_S peut être à l'aide de la relation suivante :

$$Q_S = (1 + a h) \times Q_g + b h$$

a et b étant des coefficients dépendant de la nature du matériau (cf. Tableau 3) ;

h étant l'épaisseur totale renforcement + couches non gélives de l'ancienne chaussée.

Tableau 3 - valeurs des coefficients a et b

(à faire : tableau VI.5.3 du Guide technique)

Dans le cas où l'ensemble renforcement + couches non gélives de l'ancienne chaussée est constitué de matériaux différents, les valeurs de a et b s'obtiennent à partir des expressions :

$$a = (\sum a_i h_i) / \sum h_i$$

$$b = (\sum b_i h_i) / \sum h_i$$

8.3.3 Détermination de l'indice de gel admissible IA

L'indice de gel admissible est alors déterminé à l'aide de la relation : $IA = Q_S^2 / 0,7 + 10$

8.4 Dispositions constructives

A faire : parler ici

de garantir l'étanchéité de la couche de surface

de vérifier le dispositif de drainage (état, exutoires, drains)...

9 Avantages et inconvénients des différentes solutions

Comme indiqué précédemment au paragraphe 1, deux types d'objectifs de travaux sont à envisager :

- une réhabilitation ou une remise en état d'une chaussée ayant sensiblement évolué au-delà des seuils admissibles ;
- un entretien des caractéristiques de surface sur une chaussée ayant moyennement évolué.

9.1 Réhabilitation ou une remise en état d'une chaussée ayant sensiblement évolué au-delà des seuils admissibles

Dans ce cas, les solutions techniques et les produits routiers correspondants doivent apporter un renforcement structurel à la chaussée existante.

Ces produits sont caractérisés par un module de rigidité, une résistance en fatigue et une épaisseur de mise en œuvre relativement importante à définir dans le cadre de l'étude de dimensionnement.

Les travaux de remise en état de la structure d'une chaussée sont de 3 types principaux :

- soit un rechargement de la structure existante par apport d'une ou plusieurs couches de matériaux. Ces solutions techniques modifient le niveau final de la chaussée, ce qui implique des travaux complémentaires de remise à niveau des accotements, des dispositifs de sécurité (glissières..). Elles ne conviennent pas dans le cas de traverses d'agglomération ou en milieu urbain. Elles offrent par contre l'intérêt d'augmenter l'épaisseur globale de la chaussée et de procurer une meilleure protection au gel / dégel ;
- soit un fraisage préalable suivi d'un rechargement : C'est la solution la plus courante qui permet d'éliminer les premières couches dégradées par fraisage et d'assurer un collage efficace des nouvelles couches de matériaux sur un support de bonne intégrité. Les solutions de rechargement peuvent être complétées par des purges localisées (reconstruction d'une surface limitée après décaissement partiel). La surface des purges doit être limitée à 15% de la surface de la chaussée de manière à conserver pour celle-ci une homogénéité structurelle ;
- soit une réfection partielle voire totale de la structure de la chaussée : Solution technique la plus lourde qui nécessite un décaissement de la chaussée existante avec des conséquences importantes sur :
 - le coût des travaux ;
 - la dépose et la repose de réseaux ;
 - la durée du chantier ;
 - les nuisances aux riverains (vibrations, poussières et bruit) ;
 - les nuisances aux usagers (travail par demie chaussée ou mise en place de déviations).

Les avantages de cette solution sont d'assurer une meilleure pérennité des travaux et de mieux prendre en compte la protection au gel / dégel.

Les produits que l'on peut employer pour réaliser les solutions techniques précédentes sont de 2 types :

- soit des matériaux traités aux liants hydrauliques ;
- soit des matériaux hydrocarbonés.

9.1.1 Les matériaux traités aux liants hydrauliques : graves ciment, graves traitées aux liants routiers.

Avantages : Ces matériaux ayant un module de rigidité élevé garantissent une résistance mécanique et une portance requise pour des trafics lourds importants. Ils contribuent fortement à la mise hors gel de la chaussée.

Inconvénients :

La prise hydraulique de ces produits implique un délai avant toute mise en charge par un trafic de chantier inhérent à la mise en œuvre des couches de surface.

Ce délai dépend des conditions climatiques (température, hygrométrie), du type de liant hydraulique utilisé et de son dosage.

Un produit de cure gravillonné doit être mis en œuvre pour éviter à la fois la dessiccation rapide des matériaux et l'infiltration d'eau pluviale.

Les épaisseurs de ces types de produit sont en général plus importantes que celles des matériaux hydrocarbonés, ce qui exige des profondeurs plus grandes de décaissement, donc des nuisances supplémentaires.

Les matériaux traités aux liants hydrauliques sont sujets à la fissuration de retrait et la remontée de ces fissures à travers les couches de surface est inéluctable à terme.

Ces fissures doivent être colmatées ce qui implique des travaux d'entretien à plus ou moins court terme.

Atelier requis : Grader (voire autograde pour des chantiers très importants) ou finisseur, compacteur à pneus P1 + vibrant double bille

9.1.2 Les matériaux hydrocarbonés : graves bitumes, enrobés à module élevé, graves émulsion

Les graves bitumes sont les matériaux de base pour le renforcement structurel des chaussées. Par rapport aux matériaux précédents, les graves bitumes sont caractérisées par un module moindre mais assez élevé pour des matériaux hydrocarbonés et une résistance en fatigue suffisante qui peut convenir aux trafics lourds.

9.1.2.1 Les graves bitumes

Avantages

Les teneurs en liant des GB actuelles (GB4) proches de celles des enrobés ont amélioré sensiblement leur résistance en fatigue, ce qui conduit à une restriction d'épaisseur par rapport aux GB 2 et GB 3.

Inconvénients

En renforcement comme en chaussée neuve, les épaisseurs des graves bitumes nécessitent des décaissements importants qui génèrent des nuisances aux riverains comme aux usagers (vibrations, bruit, émission de poussières, restrictions de circulation).

La teneur en liant n'excédant pas 5% rend la GB relativement poreuse, ce qui nécessite souvent la mise en œuvre d'une couche de liaison intermédiaire avec la couche de roulement.

9.1.2.2 Les enrobés à module élevé

Avantages

Les EME ont été conçus pour remplacer les GB notamment dans les cas de renforcement des chaussées en traverses d'agglomération : Leur épaisseur est plus faible que celle des GB, ce qui permet de traiter les problèmes de respect des seuils que posent les renforcements des traverses.

Leurs formulations sont voisines de celles d'enrobés avec une teneur en liant de l'ordre de 6% supérieure à celle d'une GB.

Le choix d'un liant dur (grade 15/25, 20/30 ou 10/20) permet d'obtenir un module élevé (intermédiaire entre celui d'une GB et d'un matériau traité) sans pour autant réduire la résistance à la fatigue.

Au contraire, les teneurs en liant proches de 6% donnent une résistance en fatigue sensiblement plus élevée que celle des GB, ce qui conduit à une réduction sensible des épaisseurs de matériaux à mettre en œuvre. Ceci est mis en évidence par l'étude de dimensionnement.

La richesse en liant des EME de classe 2 permet de se dispenser de la mise en œuvre d'une couche de liaison, ce qui génère une économie substantielle en coût de travaux. Elles favorisent aussi une meilleure maniabilité du produit sur chantier (intérêt pour obtenir une bonne compacité).

L'emploi d'un bitume dur favorise enfin la résistance à l'orniérage.

Inconvénients

L'emploi de bitumes durs nécessite une température d'enrobage légèrement plus élevée que les températures usuelles des enrobés « classiques », donc un coût d'enrobage supérieur.

Une attention particulière doit être accordée à la température de mise en œuvre de manière à conserver la maniabilité du produit lors de son compactage.

Atelier requis : Finisseur avec table HPC ou non, compacteurs à pneus type P1 + vibrants double bille

9.1.2.3 Les graves émulsion (GE)

La GE est un matériau préparé à partir d'un mélange d'émulsion de bitume, de granulats et d'eau, dosé et malaxé à froid, soit dans une centrale de blanc, soit dans un appareil de type malaxeur et finisseur associés et réalisé en place.

La rupture de l'émulsion se fait au contact des granulats et des matériaux dont la surface spécifique est le plus élevé, soit les sables et fines.

Le liant résiduel avec les sables et fines forme un mastic plastique riche en liant qui assure le collage des granulats entre eux.

Avantages

Ce mode de fabrication confère au produit les propriétés suivantes :

- une grande maniabilité du mélange en fin de malaxage qui se manifeste jusqu'à la fin du compactage sur le chantier ;
- une possibilité de stockage du produit en tas jusqu'à plusieurs semaines ;
- un frottement interne élevé des gros éléments entre eux équivalent à celui de la grave avant traitement. Ceci induit une résistance au fluage du produit quelle que soit la vitesse d'application des charges ;
- la plasticité du mélange permet une mise en œuvre sur des support déformables ;
- la cohésion du mastic permet d'exécuter des raccordements en biseau, jusqu'à une épaisseur nulle (matériaux idéal pour le reprofilage) ;
- la richesse en liant du mastic conduit à ralentir la remontée de fissures provenant d'un support traité aux liants hydrauliques ;
- comme pour les autres matériaux bitumineux, les GE sont bien adaptés aux aménagements progressifs ;
- la GE est bien adaptée aux travaux neufs (couches d'assise et de liaison) et aux travaux d'entretien (réparations localisées), de rechargement et de renforcement (aménagement géométrique et structurel).

Inconvénients

- le choix et le respect de la granulométrie sont très importants pour obtenir les caractéristiques recherchées, pour la facilité de la mise en œuvre et la rapidité de la prise du mélange ;
- la propreté des granulats est un facteur essentiel pour la formulation d'une GE. La présence de fines argileuses ou de matières organiques a pour effet de perturber la rupture de l'émulsion et de diminuer la portance de l'assise ;
- lors de la fabrication, la gestion en continu de la teneur en eau totale dans le mélange est un point sensible comme pour toutes les techniques à l'émulsion ;
- les stocks de granulats doivent être homogènes et avoir une hygrométrie contrôlée ;
- la mise en œuvre des GE doit être interrompue par temps de pluie ou lorsque la température sous abri est négative.

Etat du support :

- le support doit être exempt de souillures, de flaques d'eau. L'humidité de surface est compatible avec la technique ;
- si les déformations du support sont importantes ou si une épaisseur est imposée, il est préconisé d'effectuer un reprofilage préalable à la niveleuse pour réduire les tassements différentiels ;
- il n'est pas nécessaire en théorie de répandre une couche d'accrochage avant la GE. Elle garantit néanmoins une meilleure pérennité ;
- un traitement de surface (scellement) est parfois nécessaire si la couche de roulement est différée (selon les zones géographiques et la saison).

Atelier requis pour GE :

Le réglage de la GE s'effectue à la niveleuse, au finisseur, au finisseur d'intervention rapide (FIR) ou à l'aide d'un matériel spécifique qui assure à la fois la fabrication et la mise en œuvre. L'atelier mixte de compactage se compose de compacteurs à pneus de type P1 et de compacteurs tandem vibrants VT1 ou VT2.

9.1.3 Cas particulier du retraitement en place :

Les techniques de retraitement en place et à froid des couches supérieures dégradées de chaussées permettent de constituer une nouvelle couche d'assise de bonne qualité mécanique tout en valorisant les matériaux en place.

Le procédé de retraitement en place consiste à fragmenter le revêtement bitumineux sur toute son épaisseur ainsi que tout ou partie des assises granulaires sous-jacentes.

Le matériau recyclé est éventuellement corrigé par ajout de granulats conventionnels.

Un reprofilage transversal (et parfois longitudinal) peut être envisagé soit par reprofilage du matériau fragmenté, soit par apport de matériaux complémentaires qui peuvent être aussi des correcteurs.

La valorisation des matériaux de l'ancienne chaussée est obtenue par ajout d'un liant qui peut être soit hydraulique, soit hydrocarboné sous forme d'émulsion de bitume régénérante ou non, soit composé en associant un liant hydraulique et une émulsion de bitume.

L'eau nécessaire à la maniabilité du mélange est ajoutée au moment du malaxage des composants.

Le guide technique « Retraitement en place à froid des anciennes chaussées » donne une classification des types de retraitements en place en fonction des objectifs de réhabilitation visés.

9.1.3.1 Avantages des techniques de retraitement en place :

Ils sont de 3 ordres :

- Environnementaux :

- ces techniques permettent d'économiser les ressources naturelles non renouvelables et de réduire les quantités de matériaux à transporter et à mettre en dépôt définitif ;
- la réduction du transport de granulats par camions limite la fatigue du réseau routier adjacent au chantier, les nuisances sonores et contribue à la sécurité des usagers.
- Techniques :
 - elles permettent une homogénéisation des matériaux et l'élimination des fissures pouvant se localiser dans le revêtement et la partie supérieure de l'assise ;
 - les profils en long et en travers peuvent être corrigés après fragmentation des matériaux de chaussée ;
 - le retraitement en place permet enfin de limiter le rehaussement du profil de la chaussée ;
 - c'est un aspect important en site urbain et dans le cas de points singuliers (ouvrages d'art par exemple) et chaque fois qu'un problème de maintien de seuils se pose.
- Economiques :
 - ces techniques sont plus rapides en mise en œuvre qu'une reconstruction de chaussée, ce qui réduit la gêne des usagers et des riverains ;
 - le travail à froid génère une économie sensible d'énergie et de coûts indirects (préservation de l'environnement, coûts de mise en décharge définitive, protection du réseau routier avoisinant le chantier...).

9.1.3.2 Avantages spécifiques selon le choix du liant :

L'emploi de liants hydrauliques permet de réaliser une couche traitée homogène rigide assurant une bonne répartition des charges, une bonne tenue à la fatigue, donc apte à supporter un trafic lourd élevé.

Le matériau blanc restitué offre un bon comportement à la chaleur sans déformation, ni orniérage et un bon comportement aux cycles gel / dégel.

L'emploi de liant hydrocarboné (émulsion de bitume) permet par la maniabilité apportée aux mélanges d'améliorer l'uni longitudinal et l'uni transversal de la chaussée. La technique accepte des fluctuations de compositions, d'épaisseur sans évolution ultérieure des profils. Elle s'oppose très efficacement à la remontée des fissures de retrait thermique.

L'amélioration de la tenue à l'eau, obtenue notamment par une régénération éventuelle du liant, permet une restructuration des couches dégradées et d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques des matériaux retraités au comportement dit « souple ».

Par contre, cette technique à l'émulsion demande des conditions climatiques adaptées (température suffisamment élevée et absence de précipitations) qui conditionnent un mûrissement correct.

Enfin, l'émulsion doit être formulée pour être compatible avec la nature des matériaux à retraiter.

L'emploi de liants composés permet d'associer la maniabilité apportée aux matériaux par l'influence de la phase aqueuse de l'émulsion, à la rigidité adaptable au cas du chantier qui peut être comprise entre celle d'un matériau hydraulique et celle d'un enrobé.

Le matériau ainsi traité possède une capacité de déformation relative suffisante tout en étant insensible à l'orniérage.

9.1.3.3 Inconvénients des techniques de retraitement en place

Les limites de ces techniques sont les mêmes que celles des matériaux conventionnels correspondants : mûrissement des graves émulsions, délai de maniabilité des graves traitées aux liants hydrauliques, homogénéité et propreté des matériaux à retraiter...

Le comportement à long terme des matériaux recyclés est assimilé à celui des matériaux neufs : il est donc indispensable de faire une reconnaissance détaillée des matériaux en place en déterminant notamment sa granulométrie et son degré de propreté (essai au bleu de méthylène).

La présence de produits qui pourraient perturber la prise hydraulique (nitrates, sulfures, sulfates..) nécessite une élimination préalable au traitement.

La présence de pavés ou de matériaux trop gros ($D > 80$ mm) constitue des obstacles pour le passage des machines de retraitement.

En milieu urbain, la présence de nombreuses sorties de réseaux en surface de chaussée pose problème comme dans le cas d'une reconstruction neuve.

La solution consiste à enterrer provisoirement les sorties de réseaux sous le niveau atteint par la fraise de fragmentation, de bien les repérer et de les remonter au niveau de la couche de roulement après travaux. Cette procédure d'exécution permet de réaliser le retraitement en place sans contrainte dans des conditions homogènes et de repositionner correctement les sorties de réseau par rapport à la surface de la chaussée.

Atelier requis : Matériel spécifique adapté au cas du chantier (fraisage préalable en phase séparée ou fraisage associé au retraitement) et selon les coefficients LTV pour les épandeurs de pulvérulent et HEPIE1 pour les matériels de retraitement.

Le compactage est assuré par un compacteur à pneus (P1) et un vibrant double bille.

9.2 Entretien des caractéristiques de surface sur une chaussée ayant moyennement évolué.

9.2.1 Avant-propos : Cas d'une couche de roulement existante constituée d'un enrobé poreux (BBDr, BBTM de type 2) ou très mince (BBTM, BBUM)

Si l'on conserve une ancienne couche de roulement en matériaux bitumineux poreux, donc relativement riche en vides malgré un certain degré de colmatage, on risque :

- de constituer des pièges à eau au niveau de cette couche ;
- de faire travailler cette ancienne couche à l'orniérage, ce qui se produirait également dans le cas d'un nouveau BBTM sur un ancien BBTM (épaisseur globale de l'ordre de 6 à 7 cm) ;
- de faire percoler une partie de la couche d'accrochage en émulsion de bitume au travers des vides résiduels existants et de réduire d'autant le dosage en bitume et donc l'efficacité du collage de la nouvelle couche.

Pour ces cas spécifiques, un rabotage préalable de la couche de roulement existante est préconisé. Les fraisats d'enrobé peuvent être revalorisés lors de la fabrication de la nouvelle couche de roulement (granulats de caractéristiques intrinsèques bien adaptés et liant résiduel de grade plus dur conférant une résistance à l'orniérage du nouveau mélange).

Dans le cas d'une ancienne couche de roulement constituée d'un BBDr ou BBTM avec présence de fibres d'amiante dans sa composition, le fraisage préalable de cette couche est exclu sous peine de dissémination de poussières dangereuses (exemple cas de l'autoroute A2).

Un colmatage des vides résiduels à l'aide d'un coulis de ciment (+ résine éventuellement) permet d'obtenir un support peu déformable, de module plus élevé qu'à l'origine et étanche.

Dans le cas où les caractéristiques de surface d'une chaussée ont peu évolué, les solutions techniques et les produits routiers correspondants doivent satisfaire aux qualités requises pour des couches de surface et en particulier aux caractéristiques de surface pour les couches de roulement (adhérence, uni et bruit).

Un fraisage préalable des couches de surface existantes permet de s'affranchir des conditions d'interface (collage des couches) et de définir une épaisseur de mise en œuvre avec la nécessité éventuelle d'une couche de liaison.

Trois types de produits se distinguent :

- des enrobés assez épais (BBSG et BBME) qui peuvent assurer à la fois le rôle de matériaux pour couches de liaison et de couche de roulement ;
- des enrobés spécifiques minces pour couches de roulement (BBM, BBTM ou BBUM) ;
- des produits à froid permettant d'étancher la chaussée existante et de réhabiliter les caractéristiques de surface (Enduits superficiels et ECF).

9.2.2 Les béton bitumineux

9.2.2.1 Les bétons bitumineux semi grenu (BBSG)

Avantages des BBSG : Ce sont les enrobés les plus anciens et les plus couramment utilisés.

De formulation continue, ils sont classés « enrobés épais », leur épaisseur étant de 5 à 10 cm.

Ils peuvent être utilisés en couche de roulement ou de liaison. Sous trafic élevé ou sollicitations intenses, il est recommandé de choisir la classe mécanique 3 qui correspond à des produits résistants à l'orniérage (moins de 5% d'ornière à l'essai d'orniérage). Pour obtenir ces performances, il peut être nécessaire en l'absence de granulats très frottants de recourir à l'emploi d'un bitume dur ou d'un bitume de grade 35/50 avec ajout de polyéthylène lors de l'enrobage.

Inconvénients des BBSG : Leur module de rigidité relativement faible apporte peu de pouvoir renforçant, ce qui est compensé par leur épaisseur. Ce produit est mal adapté aux cas de renforcement en traverse où la profondeur de fraisage est un critère de choix essentiel.

Dans le cas d'une couche de roulement, la formulation continue du BBSG conduit à obtenir des macrotextures aux performances réduites.

9.2.2.2 Les bétons bitumineux à module élevé (BBME)

Avantages

Ce produit intermédiaire entre les EME et les BBSG a été conçu pour répondre aux besoins des chantiers de renforcement : Il peut être utilisé pour répondre à la fois aux exigences d'une couche de liaison (voire de base grâce à un module élevé) et à celles d'une couche de roulement aux mêmes performances que celles d'un BBSG.

Ils offrent donc un apport structurel pour une épaisseur globale réduite tout en assurant les services d'une couche de roulement traditionnelle.

Le module élevé est obtenu par l'emploi de bitume pur de grade 35/50 avec des additifs (gylsonite ou polyéthylène) ou des bitumes de type multigrade.

A équivalence de performances mécaniques globales, ils permettent souvent d'économiser la mise en œuvre d'une couche de chaussée en renforcement.

Sur autoroutes, ils répondent bien comme solution technique au renforcement de voies lentes ou de voies très sollicitées par un trafic poids lourds et où des contraintes de seuils exigent un fraisage préalable.

Inconvénients

Ils peuvent présenter de la fissuration thermique en zone de montagne ou à hivers rigoureux.

L'emploi de certains ajouts anti-orniérants peut nécessiter une température plus élevée lors des opérations d'enrobage, donc un surcoût, afin de conserver une bonne maniabilité lors de la mise en œuvre. Leur emploi en couche de roulement peut dans certains cas faire craindre l'apparition de fissures par le haut dues à l'utilisation d'un bitume dur.

9.2.2.3 Travaux préparatoires pour BBME et BBSG

Reprofilage du support ou fraisage si déformation transversale > 2 cm.

9.2.2.4 Atelier requis pour BBME et BBSG

Finisseur, compacteurs vibrants double bille.

9.2.3 Les enrobés spécifiques

9.2.3.1 Les bétons bitumineux minces (BBM)

Avantages

Les BBM sont les enrobés d'entretien les plus courants pour couches de roulement. De formulation souvent discontinue, ils apportent une réhabilitation de l'adhérence. Avec une épaisseur maximale de 4 ou 5 cm ils peuvent en améliorant le niveau d'uni initial être en œuvre sur des supports de qualité assez médiocre (déformés ou légèrement fissurés).

Inconvénients

Les inconvénients des BBM concernent souvent un détournement de leur domaine d'emploi : leur gamme d'épaisseur peut conduire à considérer ce produit comme un compromis entre une couche très mince d'étanchéité nécessaire sur un support médiocre et une couche plus épaisse apportant un léger pouvoir de renforcement.

Dans certaines conditions d'emploi (giratoires, zones de freinage, carrefours à feux, virages avec de fortes sollicitations du trafic), il est nécessaire d'employer des bitumes modifiés par des polymères et d'augmenter la richesse de la couche d'accrochage afin d'éviter des glissements ou des arrachements du tapis en BBM.

Travaux préparatoires :

Reprofilage du support ou fraisage si déformation transversale > 1,5 cm sous la règle de 3 m.

9.2.3.2 Les bétons bitumineux drainants (BBDr)

Avantages

Les enrobés drainants peuvent être utilisés sur des itinéraires rapides (VRU, autoroutes urbaines, autoroutes) sur lesquels les effets d'auto nettoyage apparaissent manifestes.

Ils améliorent sensiblement le confort de conduite des usagers par temps de pluie et réduisent le bruit de roulement du au trafic.

L'emploi de liants bitumineux modifiés par des polymères, souvent nécessaire sous trafic élevé, permet à ces produits de résister aux efforts de cisaillement et aux arrachements.

Inconvénients

Ces enrobés ne peuvent pas être utilisés en milieu urbain du fait de leur propension au colmatage si un effet d'auto nettoyage ne peut être assuré par le trafic.

La spécificité du comportement hivernal des BBDr demande des traitements particuliers et réduit leur domaine d'emploi.

La mise en œuvre des BBDr doit être envisagée sur une longueur suffisante d'itinéraire de manière faciliter les modalités de traitement hivernal.

Les BBDr ne sont pas recommandés dans des zones singulières de tracé comme des virages serrés, zones de freinage carrefours où les efforts de cisaillement sont élevés et où l'adhérence transversale est fortement sollicitée.

Ils ne conviennent pas aux supports déformés ou déformables où des pièges à eau pourraient se former. Un reprofilage est indispensable avant leur mise en œuvre.

Ils nécessitent une couche d'accrochage très fortement dosée en liant afin d'assurer une étanchéité suffisante du support.

Travaux préparatoires

Reprofilage du support nécessaire si déformations > 1 cm sous la règle de 3 m.

L'état du support doit permettre l'évacuation des eaux hors de la chaussée (impermeabilisation et pente)

Prévoir éventuellement des exutoires latéraux.

9.2.3.3 Les bétons bitumineux très minces (BBTM)

Avantages

Ces enrobés répondent aux propriétés requises pour des couches de roulement à hautes performances sur toutes chaussées (autoroutes, routes nationales ou départementales à trafic élevé).

Une formulation discontinue permet d'assurer un niveau toujours élevé d'adhérence.

Une couche d'accrochage très dosée assure l'étanchéité de l'interface avec les couches sous-jacentes.

L'emploi de liants bitumineux modifiés par des polymères, souvent nécessaire sous trafic élevé, permet à ces produits de résister aux efforts de cisaillement et aux arrachements.

Depuis peu, l'emploi de granularités 0/6, voire 0/4 améliore sensiblement la réduction des bruits de roulement. Les propriétés photométriques peuvent être également de bon niveau.

La résistance aux efforts de cisaillement est assurée par l'emploi de bitumes modifiés.

Inconvénients

Ils ne conviennent pas aux supports déformés (moins de 1 cm sous la règle de 3 m). Un reprofilage ou un fraisage minutieux est indispensable avant leur mise en œuvre.

9.2.3.4 Les bétons bitumineux ultra minces (BBUM)

Avantages

La formulation des BBUM découle de celles des BBTM, l'objectif étant de repousser les limites de leurs épaisseurs.

Une faible épaisseur (1 à 1,5 cm) permet de s'affranchir du fraisage latéral pour ancrage et les rabotages dus aux problèmes de seuils en traverse.

Le domaine d'emploi privilégié est donc la réhabilitation des couches de roulement en zone urbaine. La granularité 0/6 favorise la réduction du bruit de roulement.

Leur faible épaisseur (< 2 cm, soit 25 à 35 kg/m²) permet une mise en œuvre rapide faisant parfois appel à des matériels spécifiques selon les entreprises. Le coût de mise en œuvre est moindre que celui d'un BBTM.

Au niveau des performances (adhérence, bruit de roulement..) le BBUM représente un bon compromis entre le BBTM et l'enduit superficiel.

Inconvénients

Comme pour les BBTM, ils ne conviennent pas aux supports déformés (moins de 1 cm sous la règle de 3 m). Un reprofilage ou un fraisage minutieux est indispensable avant leur mise en œuvre.

Ils sont sensibles aux efforts tangentiels et aux arrachements dus aux efforts de cisaillement par le trafic.

Le support ne doit présenter aucune dégradation par ressuage ou désenrobage, ni fissurations. Cette technique d'entretien tend à être remplacée par des enduits superficiels ou des ECF, plus économiques.

9.2.3.5 Travaux préparatoires pour BBTM et BBUM

Remise au profil régulier si nécessaire par apport de matériaux ou fraisage.

Fraisage de la signalisation horizontale en résine thermoplastique.

Atelier requis : Finisseur, compacteurs à billes en mode statique

9.2.4 Les enduits superficiels et les enrobés coulés à froid (ESU et ECF)

9.2.4.1 Avantages et inconvénients

Ces techniques sont d'exécution rapide par rapport aux couches précédentes d'enrobé et la remise en circulation demande les délais les plus courts (de l'ordre d'une demie heure pour les ECF).

Elles ont aussi le grand avantage d'être peu coûteuses et d'offrir au support traité une étanchéité très performante ainsi que des niveaux d'adhérence élevé.

Si ces techniques sont les plus économiques, elles ne traitent que les problèmes d'étanchéité et d'adhérence des chaussées sans aucun apport structurel.

Elles ne sont pas conseillées dans le cas de trafic > T1.

Elles ne conviennent pas dans le cas de sollicitations particulières comme les contraintes de cisaillement (proscrire leur emploi dans les carrefours à angle droit et les giratoires), les cas de remontée de fissures ou d'uni défectueux.

Des risques d'arrachement peuvent se manifester pendant les périodes de déneigement.

Par rapport aux enduits superficiels, les ECF sont en général moins bruyants et suppriment les inconvénients liés aux rejets de granulats.

Les ECF nécessitent le recours à un matériel spécifique, qui ne peut être envisagé que pour des surfaces importantes ou dans le cadre de campagnes de renouvellement de couches de roulement.

9.2.4.2 Etat du support :

Il est conditionné par le mode de mise en œuvre des produits :

Pour les ES : Orniérage toléré < 3 cm

Pour les ECF : Orniérage toléré < 1 cm

Déflexion < 150 / 100 si trafic ≤ T 3

Déflexion = 100 / 100 si trafic = T 2

Déflexion < 50 / 100 si trafic > T 2

9.2.4.3 Travaux préparatoires :

Pour les enduits superficiels : Réaliser à l'année n-1 des emplois partiels, pontage de fissures, reprofilage.

Fraisage de la signalisation horizontale en résine thermoplastique.

Pour les ECF : Reprofilage du support si ornière > 1 cm,

Fraisage de la signalisation horizontale en résine thermoplastique.

9.2.4.4 Atelier requis :

Pour les enduits superficiels : Répandeuse à rampe télescopique, gravillonneur, compacteur à pneus type P1.

Pour les ECF : Machine spécifique à alimentation frontale ou latérale, compacteur à pneus type P1 éventuellement.

9.3 Performances et coûts des différentes techniques

Le guide technique « Aide au choix des techniques d'entretien des couches de surface des chaussées » de juillet 2003 édité par le SETRA résume dans le Tableau les performances comparées des techniques de surface.

Les tableaux 56, 57, 58, 59 récapitulent les épaisseurs d'emploi et un comparatif des coûts des diverses techniques d'entretien et de renforcement

Tableau 52 - Performances comparées des techniques de surface

		ES	ECF	BBUM	BBTM	BBDr	BBM	BBSG	BBME	
N° fiche technique		1	2	3	4	5	6	7	7	
Trafic		≤ T1	≤ T1	Tous	Tous	≥ T3	Tous	Tous	Tous	
Épaisseur de mise en œuvre (en cm)		0,5 à 1,5	1 à 1,5	1,5 à 2	2 à 3	3 à 5 ⁽¹⁾	3 à 5	8 maxi ⁽²⁾	8 maxi ⁽²⁾	
Critères de performance	Caractéristiques intrinsèques	Adhérence	+ à ++	+	+ ⁽³⁾	+ à ++ ⁽³⁾	+ ⁽³⁾⁽⁴⁾	- à +	-	-
		Réduction des projections d'eau	+	-	+	- à +	++	-	--	--
		Réduction du bruit de roulement	--	- à +	- à +	- à ++	+ à ++ ⁽⁵⁾	-	-	-
		Résistance à l'orniérage	Sans objet ⁽⁶⁾	Sans objet ⁽⁶⁾	Sans objet ⁽⁶⁾	Sans objet ⁽⁶⁾	++	- à +	+ à ++	++
		Résistance aux efforts de cisaillement	--	-	-	-	--	- à +	+	+
	Adaptabilité au support	Aptitude de la technique à améliorer l'uni (Po)	--	--	-	- à +	+	+	+	+
		Aptitude de la technique à limiter la remontée des fissures "seule" ⁽⁷⁾	--	--	--	--	--	-	+	-
	Conditions d'exploitation	Viabilité hivernale	+ ⁽⁸⁾	-	--	- à + ⁽⁹⁾	--	+	+	+

⁽¹⁾ 3 à 4 cm pour les BBDr 0/6 et 4 à 5 cm pour les BBDr 0/10.
⁽²⁾ 5 à 7 cm pour les BB 0/10 et 6 à 8 cm pour les BB 0/14.
⁽³⁾ ++ pour les 0/6 dans le cas de pentes ≤ 5 %.
⁽⁴⁾ Valable pour des rayons ≥ 250 m ou 600 m selon la vitesse autorisée (90 km/h ou > 90 km/h).
⁽⁵⁾ Au jeune âge.
⁽⁶⁾ doit être assurée par les couches inférieures.
⁽⁷⁾ se reporter à la fiche 9 pour les systèmes retardant la remontée des fissures.
⁽⁸⁾ risque d'arrachements pendant les opérations de déneigement.
⁽⁹⁾ - pour les classes 2 et + pour les classes 1.

Notation			
Ne convient pas	Moyen	Bon	Très bon
--	-	+	++

Tableau 53 - Epaisseurs nominales et minimales des produits

Produits	Granularités	Epaisseurs minimales (cm)	Epaisseurs nominales (cm)
GB	0/14	6	8 - 10
	0/20	8	10 - 16
EME	0/10	5	6 - 8
	0/14	6	7 - 13
	0/20	8	9 - 15
BBSG	0/10	4	5 - 7
BBME	0/14	5	6 - 9
BBM	0/10	2,5	3 - 4
	0/14	3	3,5 - 5
BBDr	0/6	2	3 - 4
	0/10	3	4 - 5
BBTM	0/6	1,5	2 - 3
	0/10	1,5	2 - 3
BBUM	0/6	1,5	1,5 - 2
	0/10	1,5	1,5 - 2

Tableau 54 - Comparatif des coûts des matériaux d'assise utilisés en techniques d'entretien et de renforcement

Produits / procédés	Epaisseurs (cm)	Coûts HT/tonne	Coûts HT / m ²
GB 3 ou 4	10 cm	55 €	12 à 16 €
EME 2	10 cm	60 €	13 à 17 €
Graves-émulsion	10 cm	45 €	10 €
Retraitements en place			
Aux liants hydrauliques	20 à 30 cm		10 €
A l'émulsion de bitume	10 cm		9 €
Au liant composé	10 cm		14 €

Tableau 55- Comparatif des coûts des matériaux pour couches de surface utilisés en techniques d'entretien et de renforcement

Produits / procédés	Épaisseurs ou dosages	Coûts HT / tonne	Coûts HT / m ²
BBSG	6 cm	57 €	8 à 12 €
BBME	6 - 7 cm	75 €	14 €
BBDr	4 cm	90 €	7 €
BBM	4 cm		8 à 9,5 €
BBTM	3 cm		6,5 €
BBUM	2 cm		3 à 4 €
ESU	2 cm		
ESU Monocouches			1,15 €
ESU Bicouches			2,10 €
ECF	2 cm		
ECF Monocouches	15 kg /m ²		2 €
ECF Bicouches	25 kg /m ²		3,25 €

Tableau 56 - Coûts des préparations du support

Procédés	Épaisseurs (cm)	Coûts HT / m ²
Balayage		0,10 €
Fraisage (Évacuation et balayage compris)	1	2,5 €
	3	4 €
	5	5 €
	10	7 €
Fraisage de précision		1 à 2 €

Chapitre 5 – Dispositions constructives

1 Drainage

1.1 Nécessité du drainage des chaussées :

Le but du drainage est de lutter contre la présence d'eau dans le sol, en particulier sous la chaussée et à ses abords.

Les principales fonctions du drainage sont les suivantes :

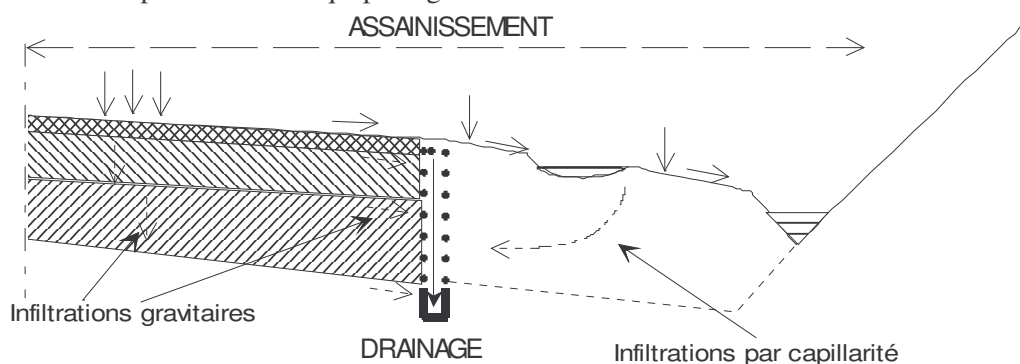
1.1.1 Drainage du corps de chaussée :

Consolidation des portances et maintien des caractéristiques mécaniques des différentes couches de la chaussée

- Stabilisation des abords immédiats de la chaussée.
- Amélioration des caractéristiques mécaniques des sols en cas notamment de remontée des nappes phréatiques.
- Conservation des portances en particulier en périodes humides et de cycles gel / dégel.
- Meilleure tenue des chaussées dans le cas d'assises en matériaux non traités ou traités avec des perméabilités différentes conduisant à la circulation d'eau aux interfaces.
- Évacuation de l'eau.

1.1.2 Drainage superficiel des revêtements de chaussée (assainissement) :

Domaine de la sécurité des usagers : Récupération des eaux superficielles pour éviter les accumulations d'eau conduisant au phénomène d'aquaplanage.



1.2 Dispositions constructives pour créer un système de drainage ou l'améliorer

1.2.1 Cas du drainage du corps de chaussée :

Lorsque par exemple au cours d'un carottage, les cavités sont remplies d'eau, il apparaît nécessaire d'améliorer le drainage du corps de chaussée.

Les procédés courants sont les suivants :

- fossés profonds :
 - de profondeur supérieure à 50 cm destinés à recueillir les eaux de ruissellement et de permettre le rabattement de la nappe sous certaines conditions ;
 - pour être efficaces, ils devraient être positionnés à 1 ou 2 m de la rive de la chaussée et associés à un matériau drainant en accotement ;
 - les contraintes en matière de sécurité imposent le respect d'une zone de 7 m pour les routes neuves et de 4 m pour les routes existantes avec la rive de la chaussée, ce qui remet en cause l'efficacité du fossé ;
 - dans le cas de mise en place d'une glissière de sécurité, une zone de récupération de 2 m doit être respectée entre le bord de la voie et le droit de la glissière ;
 - il est souvent plus efficace de remplacer le fossé profond par une tranchée drainante.
- les tranchées drainantes :
 - elles ont 2 objectifs :
 - drainer le sol support ;
 - abaisser le niveau d'eau sous la plate-forme (gain de portance à court terme et protection vis à vis du gel-dégel).

Elles sont le plus souvent utilisées lorsque la réalisation du déblai nécessite un rabattement de nappe. Leur profondeur est variable (jusqu'à 6 m en tranchée mécanisée). Elles sont remplies d'un matériau drainant entouré d'un filtre géotextile pour éviter le colmatage par le sol environnant. A la base du matériau drainant un drain est correctement réglé en fond de tranchée.

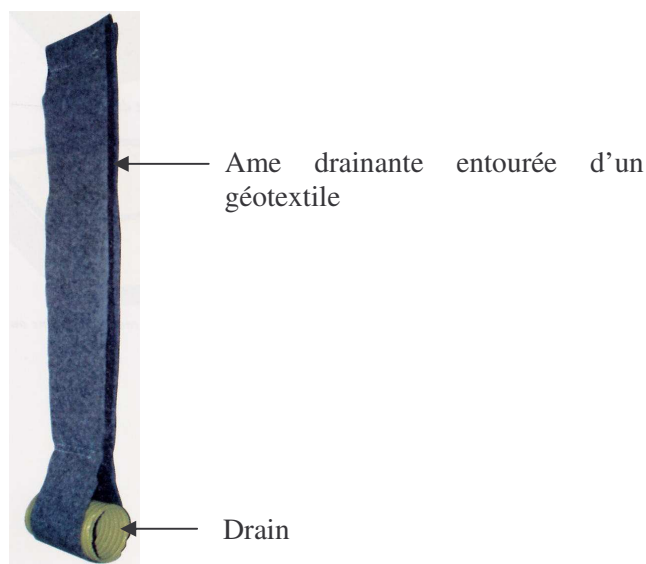
- les saignées drainantes et épis drainants :
 - l'objectif visé est d'évacuer les eaux qui percolent au travers de la chaussée ;
 - elles se mettent en place sous accotements dans des zones d'accumulation d'eau ou points bas. Elles doivent toujours être associées à une couche de forme drainante dont elles constituent l'exutoire vers un fossé ou une tranchée drainante.
- les écrans de rives de chaussée¹⁷ (EDRC) :
 - l'objectif de l'écran de rive est :
 - d'améliorer l'état hydrique des matériaux du corps de chaussée et du sol support sur une certaine épaisseur selon le type de chaussée ;
 - d'évacuer les eaux ayant pénétré dans le corps de la chaussée ;
 - de réduire les venues d'eau depuis les accotements.

Contrairement aux tranchées drainantes, l'EDRC ne doit pas être posé en grande profondeur (maximum 1,50 m) et ne doit pas être utilisé pour rabattre une nappe.

Tout en améliorant la portance générale de la chaussée, l'EDRC est recommandé pour lutter contre la dessiccation et obtenir une meilleure protection vis-à-vis du gel-dégel.

Il est constitué par un filtre en géotextile enveloppant une âme drainante avec éventuellement un dispositif collecteur en partie inférieure.

¹⁷ Notes d'information SETRA N° 34 de janvier 1988 et N° 74 d'octobre 1992



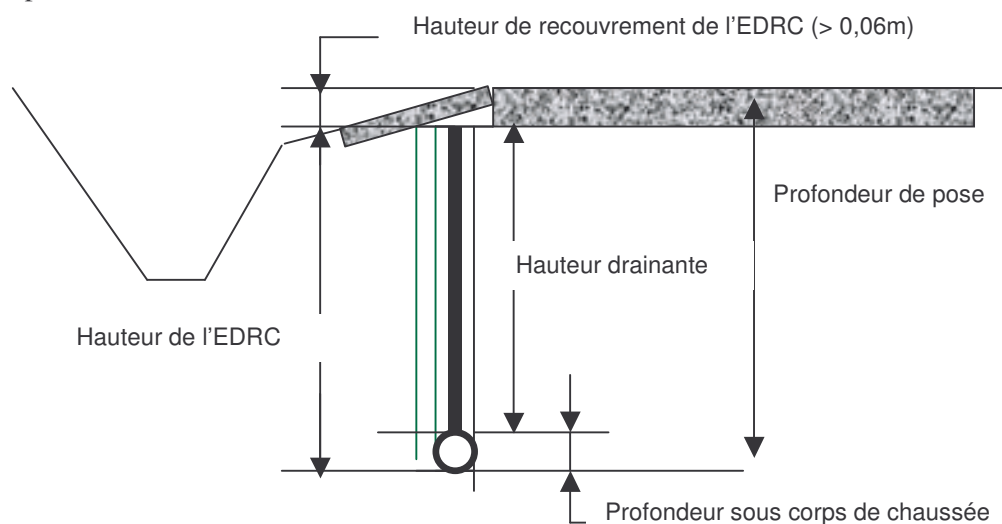
Il est généralement positionné en limite de l'accotement et de la structure de la chaussée.

Il peut également être implanté :

- latéralement en pied de talus ;
- latéralement sous les bords extrêmes des couche de forme ou de fondation pour les chaussées souples ;
- dans l'axe d'un terre-plein central ;
- en rive de chaussée au contact de la structure dans le cas des chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques ou rigides et lorsque le matériau constituant l'accotement est moins perméable que celui de la chaussée.

Les EDRC sont bien adaptés au cas des chaussées rigides et à assise traitée aux liants hydrauliques. La profondeur est limitée au corps de chaussée et le rôle essentiel de l'EDRC est d'évacuer les eaux d'infiltration au niveau des interfaces (remontées de laitance), des fissures et/ou des joints non imperméabilisés.

L'évacuation des eaux ne doit pas entraîner le départ de fines, ce qui pourrait altérer la granulométrie des matériaux en place.



La profondeur de pose est variable en fonction du type de chaussée et du niveau de la chaussée dont l'amélioration de l'état hydrique est souhaité (sous l'arase pour la PST, selon la profondeur de gel, partie du sol support et hauteur du corps de chaussée).

La mise en œuvre est soit manuelle soit mécanisée après ouverture d'une tranchée étroite sur une profondeur pouvant varier de 30 cm à 1 m.

La pose mécanisée est recommandée et offre une plus grande garantie de qualité.

Le remblayage s'effectue avec les matériaux du site en évacuant les blocs les plus gros (maximum 100 mm). Il est conseillé d'effectuer un remblayage partiel en alternant avec un compactage en conformité avec les prescriptions du Guide « Remblayage des tranchées »

Guide SETRA-LCPC 1994 référence D9441 ».

La mise en œuvre des EDRC fait l'objet d'un marché spécifique et elle nécessite une compétence particulière de l'entreprise qui doit être spécialisée dans la pose d'EDRC.

- les couches drainantes :

La couche drainante est constituée d'un matériau granulaire très perméable destiné à intercepter un courant d'eau, ascendant ou descendant.

L'épaisseur de la couche qui peut varier de 10 à 40 cm dépend des débits à collecter.

Des drains peuvent être insérés dans le cas de débits importants.

Elles sont mises en œuvre en général entre chaussée et sol support ou entre une couche imperméable et sol support.

- les puits (drainage vertical) :

Ils assurent ponctuellement l'évacuation verticale des eaux par relèvement jusqu'à un exutoire en surface.

Ils sont utilisés de manière temporaire, au moment des terrassements.

- prescriptions relatives aux matériaux :

- les GNT :

les matériaux utilisés dans les dispositifs de drainage doivent être essentiellement drainants. Le pouvoir drainant est révélé par la facilité avec laquelle l'eau s'écoule à travers le matériau. Ce pouvoir est directement lié à la teneur en vides des matériaux.

Une grave creuse 0/30 ou 0/40 avec un ES > 50 ou VBS ≤ 0,1 g de bleu par 100g de sol, un passant à 2 mm < 10% avec pas plus de 5% de fines pourrait convenir.

Cette grave doit être protégée par un géotextile de la contamination par des fines venues des sols. Ce géotextile assure un pouvoir filtrant nécessaire pour la conservation de la granulométrie de la grave.

- les bétons poreux :

Cette technique présente des avantages dans les cas suivants :

- cas de chantiers d'accès difficiles et où le compactage est délicat
- cas de réseaux denses avec des possibilités de compactage réduites
- lorsque la couche drainante doit posséder des résistances mécaniques élevées

Le béton poreux a une porosité de l'ordre de 15 à 25 % et des critères de résistance mécanique en compression à 90 jours voisines de 10MPa.

La nature minéralogique des granulats et le type de liant hydraulique sont à choisir en fonction de l'agressivité des eaux locales.

Des matériaux de type auto-compactants non essorables peuvent avantageusement se substituer aux bétons poreux.

- Drains et tuyaux drainants :

Ils sont destinés à assurer la collecte de l'eau par leur périphérie et à faciliter son évacuation rapide (rôle d'un simple tuyau).

Généralement construit en PVC ils sont de forme ronde, ovoïde ou à fond plat.

Des cannelures (formes annelées) renforcent leur résistance à l'écrasement.

La collecte de l'eau en périphérie s'effectue par pores diffus, fentes, perforations répartis sur toute la périphérie ou localisés dans la partie haute seulement (drains à « cunettes »).



Photo n° 12 : drain souple annelé enrobage géotextile synthétique
(photo CETE Nord - Picardie / LRPC)



Photo n° 13 : drain rigide annelé à cunette (photo CETE Nord -
Picardie / LRPC)

1.2.2 Cas du drainage superficiel des revêtements de chaussée :

Les ouvrages de collecte sont placés soit en bordure, soit dans l'axe central de la chaussée de manière à recueillir les eaux de ruissellement (pluies et fontes des neiges).

Ils sont préconisés en zone urbaine, dans les régions à forte pluviométrie et lorsque la géométrie de la chaussée favorise l'existence de zones d'accumulation d'eau (changements de dévers, points bas..)

Les dispositifs utilisés sont les suivants :

- caniveaux profonds ;
- fossés ;
- bordures ;
- bourrelets en enrobé ;
- cunettes.

La récupération des eaux nécessite la pose d'avaloirs associés à des regards préfabriqués équipés de grilles permettant de filtrer les débris pouvant colmater les collecteurs.

Dans le cas particulier d'un revêtement en enrobé drainant, le support doit être suffisamment plat pour éviter la rétention d'eau et imperméable (couche d'accrochage surdosée).

La récupération des eaux de ruissellement doit se faire au niveau de la base de la couche d'enrobé drainant.

La mise en œuvre de drains ou des dispositifs précédents nécessite une pente de pose de l'ordre de 1 à 3 mm par mètre.

2 CARREFOURS GIRATOIRES

2.1 Spécificités des carrefours giratoires :

Les carrefours giratoires sont caractérisés au niveau de la construction par des contraintes particulières de réalisation :

- superficies réduites ;
- faible tonnage de matériaux ;
- choix d'un matériel adapté ;
- exigüité du chantier ;
- phasage complexe ;

- raccordement délicat aux chaussées existantes.

Dans le cas de giratoires de faibles rayons (< 30 m), viennent s'ajouter les contraintes suivantes :

- réalisation du joint longitudinal ;
- compactage difficile ;
- travail non mécanisé.

Les mêmes contraintes sont rencontrées lors des renforcements.

Les carrefours giratoires sont caractérisés au niveau de leur exploitation par des particularités liées aux transferts de charge :

Dès la mise en service, il est rencontré les spécificités suivantes :

- transferts de charge et contraintes fortes sur les voies d'accès (zones de freinage et d'accélération) ;
- trafic canalisé sur l'anneau ;
- vitesse faible (temps de charge long et dimension du module de rigidité, risque d'orniérage) ;
- déport de charges (surcharge sur l'essieu extérieur et fuite possible de carburant) ;
- efforts tangentiels élevés dus aux véhicules de grande taille.

2.2 Préconisation de dimensionnement de structures types :

2.2.1 Couches d'assises :

Pour tenir compte des problèmes de surcharge, de difficultés de compactage et de variation d'épaisseur, il est recommandé de majorer les épaisseurs de couches d'assise de 10 à 15 % par rapport aux épaisseurs habituelles.

Les matériaux recommandés sont les Graves Bitumes de classe 3 ou 4 ainsi que les EME de classe 2.

2.2.2 Couches de roulement :

Sur les giratoires de faibles rayons ou fortement circulés, les couches minces sont à proscrire, l'épaisseur recommandée est au moins de 6 cm de façon à résister aux efforts de cisaillement et limiter les contraintes à l'interface couche de base / couche de roulement.

Les produits les plus adaptés sont les BBSG 0/10 ou BBME 0/10 de classe 2 ou 3.

Ces produits utilisant des liants modifiés ou multigrades sont particulièrement résistants à l'orniérage engendré par un trafic canalisé.

Par ailleurs, on ne recherche pas une macrorugosité élevée du fait des faibles vitesses pratiquées et le choix de granularité 0/10 associé à une PMT de l'ordre de 0,50 convient pour ce type d'ouvrage.

2.3 Préconisations pour la mise en œuvre des enrobés :

L'emploi de 2 finisseurs en parallèle est un gage de réussite du joint longitudinal.

Cependant, si le rayon du giratoire est faible ou si les travaux sont réalisés sous circulation, il sera impossible de réaliser la mise en œuvre avec 2 finisseurs en parallèle et toutes dispositions seront prises pour réaliser un joint longitudinal froid dans les meilleures conditions (réchauffage du joint, sciage ou produits spécifiques pour joints).

Un plan de calepinage doit être préparé de manière à ce que les joints transversaux ne soient pas sollicités par le trafic principal.

Dans le cas de la mise en œuvre de 2 anneaux, l'application doit commencer par l'anneau situé au point bas et continuer par l'anneau situé en point haut.

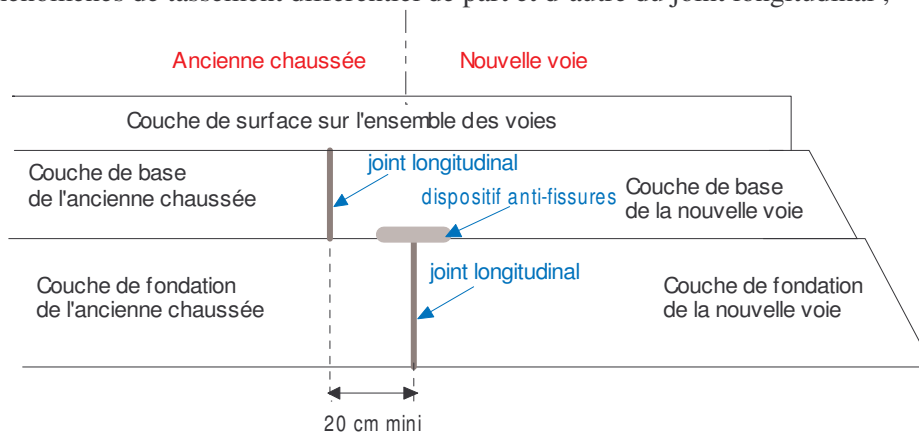
Prévoir un matériel de transport d'enrobé et de compactage adapté à la géométrie du giratoire.

3 ELARGISSEMENTS

3.1 Conception des structures des élargissements :

La tenue mécanique des voies élargies est tributaire des dispositions constructives suivantes :

- prévoir une sur largeur des couches d'assise suffisante pour éviter les effets de bord dus aux charges à supporter ;
- décaler la nouvelle couche de base sur la couche de fondation de l'ancienne chaussée de manière à décaler les joints et reprendre en partie la répartition des charges sur la structure existante. Cette disposition permet d'éviter les phénomènes de tassement différentiel de part et d'autre du joint longitudinal ;



- si les matériaux de couches d'assise sont de modules de rigidité très différents (matériaux hydrauliques et bitumineux) un dispositif retardateur des remontées des fissures sera mis en œuvre au niveau du joint ;
- les principaux dispositifs retardateur de remontées de fissures sont les suivants :
 - géotextiles imprégnés ;
 - sable-enrobés riches en bitume modifié mis en œuvre par un finisseur ;
 - équipé d'une table de faible largeur (minifinisseur) ;
- éviter de positionner le joint longitudinal dans l'axe d'une bande de roulement ;
- prévoir un dispositif de drainage efficace en bordure extérieure de l'élargissement ;
- la couche de roulement doit être mise en œuvre à la fois sur la voie existante et la nouvelle voie de manière à éviter un joint longitudinal supplémentaire et assurer la continuité des caractéristiques de surface ;

4 Mise en œuvre, uni, épaisseurs

4.1 Qualité de l'uni longitudinal des chaussées en fonction du nombre de couches, de leurs épaisseurs et des systèmes de guidage utilisés

La qualité de l'uni longitudinal et final d'une chaussée dépend d'un certain nombre de facteurs :

- du niveau de qualité du support :
 - un support dont l’uni est de mauvaise qualité nécessite un reprofilage préalable par ajout d’une couche de matériaux ou par un rabotage de précision (guidage laser de la raboteuse par exemple) ;
 - ces dispositions sont nécessaires en particulier en entretien et en réhabilitation avant la mise en œuvre de techniques minces ou très minces telles que ESU, ECF, BBUM, BBTM, BBM, BBDr ;
 - en matière de gain d’uni, un fraisage est équivalent à la mise en œuvre d’une couche (voir la norme NF P 98-150-1 de janvier 2008 « Exécution des assises de chaussée, couches de liaison et couches de roulement »).
- de la nature et de l’épaisseur de la couche à réaliser :
 - la qualité de l’uni dépend en partie de la maniabilité des matériaux, liée à la teneur en liant bitumineux ou à la teneur en eau pour les MTLH, à la teneur en éléments fins (sables et fines) à la forme des granulats ;
 - plus une couche est épaisse moins il est facile d’augmenter la qualité de l’uni ;
 - la mise en œuvre d’une couche mince ou très mince en couche de roulement permet d’améliorer uniquement la qualité de l’uni en petites ondes.
- du nombre de couches :
 - plusieurs couches successives permettent d’augmenter la qualité de l’uni final, sachant que selon l’épaisseur, la correction portera sur les ondes moyennes (couches les plus épaisses, de base ou de liaison) ou sur les petites ondes (couches minces ou très minces de roulement).
- du mode de guidage adopté :
 - pour des couches épaisses en matériaux bitumineux, un guidage à la poutre, voire sur fils, est préconisé.
 - pour des matériaux hydrauliques, le guidage s’effectue sur fils en nivellement (emploi de la niveleuse)
 - ces modes de guidage influencent notamment la note d’uni en ondes moyennes
 - pour des couches de roulement minces, très minces, le guidage en vis calé permet un auto nivellement par le finisseur qui conserve la qualité de l’uni acquis en grandes ondes et en ondes moyennes et permet de corriger l’uni en petites ondes.

La Note d’info SETRA N°90 (août 1996) : « Uni et mise en œuvre » résume l’ensemble de ces grands principes dans le tableau suivant :

Traitement	Construction	Réhabilitation Renforcement	Entretien
Grands ondes	Forme + fondation	Difficile	Sans objet
Ondes moyennes	Base	Rechargement	Uniquement bétons bitumineux
Petites ondes	Liaison + roulement	Roulement	Principalement bétons bitumineux

4.2 Circulaire « UNI » N° 2000-36 du 22 mai 2000

Ensemble de documents comportant :

- une circulaire qui fixe les spécifications en matière de notes d’uni par Bandes d’ondes pour les différents cas de chantiers (travaux de construction, de réhabilitation et d’entretien) et selon la vitesse nominale de l’itinéraire.

A noter que des spécifications particulières sont indiquées pour les travaux de réhabilitation et d’entretien.

Pour des travaux de réhabilitation avec mise en œuvre d'une couche supérieure à 5 cm, les spécifications sont variables :

- selon la taille du chantier (lot de contrôle de 200 à 1000 m, de 1000 m, de 4000 m) ;
- selon le niveau des notes en petites ondes obtenues sur le support.

Pour des travaux de réhabilitation avec mise en œuvre de 2 couches dont l'une peut être un reprofilage général de la voie, les spécifications sont variables :

- selon la taille du chantier (lot de contrôle de 200 à 1000 m, de 1000 m, de 4000 m) ;
- selon le niveau des notes en petites ondes obtenues sur le support.

Pour les travaux d'entretien, le caractère obligatoire du contrôle de l'uni n'apparaît plus. Cependant il est conseillé pour la mise en œuvre de couches d'épaisseur suffisante, dans le cas d'un chantier permettant des contrôles sur 1000 m ou si les travaux ont été motivés par une dégradation de la qualité de l'uni.

Les spécifications concernent :

- la mise en œuvre d'une couche d'épaisseur inférieure ou égale à 3 cm avec une note d'uni du support en petites ondes supérieure ou égale à 3 ;
- la mise en œuvre d'une couche d'épaisseur supérieure à 3 cm et inférieure ou égale à 5 cm avec une note d'uni du support en petites ondes supérieure ou égale à 3.

Cette circulaire tient compte de façon réaliste du statut de l'itinéraire, de la longueur du chantier (influence sur la pertinence de l'essai), de la qualité de l'uni du support et des couches mises en œuvre (nombre, épaisseur, reprofilage préalable).

La note CFTR N° 2 de janvier 2001 présente la circulaire de manière comparative avec l'ancienne.

Remarques :

Si à ce jour, l'application depuis 2001 de la circulaire « uni » semble ne pas rencontrer vraiment de difficultés, des défauts d'uni à caractère répétitif ou des phénomènes de roulis peuvent rendre la chaussée inconfortable. Ils génèrent des accélérations verticales (secousses) à bord des véhicules, créant un inconfort pour l'usager.

Ces défauts d'uni, non repérés lors du dépouillement du signal APL, n'empêchent pas de prononcer la conformité de l'ouvrage. Ils concernent le domaine de petites ondes et peuvent être produits par des arrêts intempestifs du finisseur ou des à-coups dans l'avancement de celui-ci.

Ces défauts de faible amplitude peuvent avoir un caractère périodique (sinusoïdal) venant s'ajouter au caractère répétitif précédent. Dans ce cas, le domaine des ondes moyennes est concerné. Si le défaut est sans effet aux vitesses élevées sur les véhicules légers, il devient gênant pour les poids lourds (empatement plus grand). Un dysfonctionnement ou un mauvais réglage d'un organe du finisseur peut être à l'origine de ce défaut.

Le dépouillement du signal APL en analyse DSP (Densité Spectrale de Puissance) permet de détecter ce type de défaut d'uni. Voir l'article du GNCDS – Sous groupe « Uni longitudinal » (31 août 2007)

- des clauses contractuelles pour l'application de la circulaire
- un guide technique pour l'application de la circulaire qui propose des solutions techniques indicatives pour obtenir des niveaux des spécifications (valeurs de notes d'uni) indiqués dans la circulaire.

Il rappelle l'influence de la nature et l'épaisseur de la couche, celle des conditions de chantier (météo, travaux de nuit ou de jour, fractionnement du chantier, sous circulation ou non).

Il met particulièrement en évidence l'adaptation aux types de chantiers des matériels de mise en œuvre utilisés et l'influence de leurs modes de guidage sur la qualité de l'uni.

Pour les travaux de réhabilitation, le niveau d'uni prévisible dépend en grande partie de celui de l'ancienne chaussée. En 2 couches, il est possible de corriger d'abord les ondes moyennes, puis les petites ondes.

Des mesures d'uni sur l'ancienne chaussée sont donc indispensables pour augurer d'un niveau d'uni final souhaité.

- Cas de la réhabilitation en une couche épaisse ($e > 5$ cm) :

- la circulaire définit les spécifications d'uni en petites ondes et en ondes moyennes pour la couche de roulement. Le niveau d'uni en petites ondes de l'ancienne chaussée doit être suffisant pour atteindre les spécifications demandées.
- si l'ancienne chaussée n'a pas les caractéristiques nécessaires ou si des objectifs d'uni plus élevés sont souhaités pour la couche de roulement, il est nécessaire de prévoir un reprofilage localisé ou général.

- Cas de la réhabilitation en 2 couches :

- ces travaux consistent à réaliser soit une couche de roulement après reprofilage ou 2 couches en matériaux bitumineux.
- des tableaux définissent le niveau minimal d'uni préconisé de l'ancienne chaussée et la première couche de réhabilitation selon le type de réseau (vitesses nominales)

2 cas sont différenciés selon l'épaisseur de la couche de roulement ; soit mince (< 5 cm), soit épaisse (≥ 5 cm).

A noter que les travaux de réhabilitation en 2 couches ne peuvent pas améliorer l'uni en grandes ondes.

Si l'ancienne chaussée n'a pas le niveau minimal préconisé, un reprofilage préalable est nécessaire ou des exigences d'uni restreintes, en ondes moyennes, doivent être spécifiées.

Exemple de tableau du guide définissant les niveaux d'uni préconisés sur l'ancienne chaussée et de la première couche de réhabilitation (Cas d'un réseau à 90 km/h ; couche de roulement mince < 5 cm).

Longueur d'ondes	Note minimale d'uni pour		Spécifications pour la couche de roulement
	Ancienne chaussée	1 ^{ère} couche de réhabilitation	
PO	≥ 3	≥ 5	100% des notes ≥ 6 100% des notes ≥ 7
MO	≥ 4	≥ 6	100% des notes ≥ 6 100% des notes ≥ 7

Pour des travaux d'entretien, on distingue les 2 cas suivants :

- entretien en une couche d'épaisseur inférieure ou égale à 3 cm ($e \leq 3$ cm)

Le niveau d'uni de la couche de roulement dépend en grande partie de celui de la couche support lors de la mise en œuvre d'une couche mince.

Pour tous réseaux, toutes les notes petites ondes doivent être supérieures ou égales à 5 et aucune spécification n'est prévue en ondes moyennes et en grandes ondes.

Pour atteindre cet objectif, l'ancienne chaussée doit avoir une note minimale en petites ondes au moins égale à 3.

Si ce n'est pas le cas, un reprofilage préalable est nécessaire.

Dans tous les cas, les épaisseurs minimales doivent être conformes aux règles normatives du produit mis en œuvre

- entretien en une couche d'épaisseur comprise entre 3 et 5 cm ($3 < e \leq 5$ cm)

Le niveau d'uni de la couche de roulement dépend en grande partie de celui de la couche support lors de la mise en œuvre d'une couche d'épaisseur comprise entre 3 et 5 cm.

Si l'ancienne chaussée n'a pas les caractéristiques nécessaires, ou si des objectifs d'uni plus élevés sont souhaités pour la couche de roulement, il est nécessaire de prévoir un reprofilage localisé ou général.

Dans tous les cas, la note d'uni en grandes ondes ne peut être améliorée.

Ateliers types :

Le chapitre IV du guide propose des ateliers de mise en œuvre en fonction des cas de chantiers les plus fréquents et pour des matériaux usuels (GNT, MTLH, enrobés, béton de ciment) et selon le rang de la couche concernée (le rang 1 étant celui de la couche de roulement)

- La méthode d'essai N° 46 : « Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques »

4.3 Identification des défauts d'uni des chaussées lors de leur mise en œuvre.

La note d'info CFTR N° 3 de 2001 présente des cas typiques de défauts d'uni des couches de chaussée recensés au cours de tests de qualification de la méthode d'essai N° 46.

Dans un tableau, elle indique la nature du défaut, la ou les gammes d'ondes concernées, la signature du défaut (pseudo-profil) et la méthode de rectification.

Les défauts sont :

- joint de reprise journalière : Petites ondes concernées
- arrêt prolongé de finisseur : Petites ondes concernées
- pompage du vérin de la table du finisseur : Petites ondes et ondes moyennes concernées $\lambda > 2,8$ m
- problème de table non identifié : Petites ondes concernées $\lambda < 2,8$ m
- mauvais guidage sur fil : Petites ondes et ondes moyennes concernées $2,8 \text{ m} < \lambda < 11 \text{ m}$
- guidage sur la voie adjacente : recopie des défauts d'uni (ondes moyennes et grandes ondes concernées) existants sur cette voie.

4.4 Types de guidage des finisseurs

Le document « Mise en œuvre au finisseur », CR 29 2002 du LCPC (M.L. Galenne) rappelle le mode de fonctionnement des finisseurs et notamment l'incidence des réglages et des modes de guidage sur la qualité de l'uni longitudinal de la couche de roulement.

Il donne une idée des gains en note d'uni par gammes de longueurs d'ondes selon le rang de la couche concernée (rang 1 pour la couche de roulement) ainsi que du gain moyen et minimum par bandes d'ondes en fonction des modes de guidage.

Le tableau suivant indique les types de guidage conseillés en fonction du rang et de l'épaisseur de la couche.

Rang de la couche	Epaisseurs	Types de guidage
1	≤ 3 cm	Sans guidage (vis calées)
1	> 3 cm	Sans ou guidage sur poutres courtes
2	< 5 cm	Guidage sur poutres courtes
2	> 5 cm	Guidage sur poutres courtes ou longues
3	Souvent > 5 cm	Guidage sur poutres longues, sur fils ou laser
4	Toujours > 5 cm	Guidage sur poutres longues, sur fils ou laser
5	Couche de forme	Guidage sur fils ou par laser

La norme NF P 98-150-1 de janvier 2008 « Exécution des assises de chaussée, couches de liaison et couches de roulement » donne le même type de tableau.

ANNEXES

1 Annexe 1 – Application du Rayon de courbure aux chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

1.1 Particularité du paramètre « Rayon de courbure »

Le rayon de courbure représente la dérivée seconde au sommet de la déformée de la surface de la chaussée sous une charge.

Il est plus sensible que le paramètre déflexion aux variations de qualité des couches traitées, en particulier de la partie supérieure des couches de base, aux variations d'épaisseurs des assises en MTLH.

Lorsque le nombre de mesures est important, la représentation sous forme de schémas itinéraires du rayon de courbure apparaîtra toujours plus hétérogène que le graphe des déflexions. En effet, rappelons que pour une structure nominale, la dispersion normale de mise en œuvre des épaisseurs (par exemple 3 cm) et des modules (par exemple 10%) entraîne une dispersion normale importante du rayon de courbure, de l'ordre de 10 à 20% de la valeur nominale.

1.2 Mode d'acquisition du paramètre « rayon de courbure » sur chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques ou Mixtes.

1.2.1 Mesures ponctuelles sur zones témoins :

Sur ces chaussées dont le bassin de déflexion est grand, la mesure à la poutre BENKELMAN n'est pas significative si les résultats sont utilisés pour le calage d'un modèle, mais elle peut détecter les anomalies de type « décohésion de la partie supérieure sur au moins 2 à 3 cm (associé à un niveau de déflexion relativement peu élevé) » ou de type « couche MTLH décohésionnée ou sans prise (associé avec déflexion élevée) ».

Il est plutôt conseillé d'utiliser un dispositif inclinométrique ponctuel

La densité de points de mesures par zone de 200 m doit être au minimum de 10, compte tenu de la dispersion de comportement pouvant être rencontrée.

1.2.2 Mesures à grand rendement :

Sur ces chaussées, le paramètre rayon de courbure peut être délivré :

- soit par un déflectographe équipé d'inclinomètres (dispositif type RCMES ou RCFLASH) ;
- soit par le curviamètre.

1.3 Mode d'exploitation du paramètre mesuré.

Sur les chaussées épaisses peu déformables la sensibilité de l'appareil est insuffisante et le taux de valeurs déclarées non significatives peut être important dès que l'on atteint des rayons de courbure élevés ($R > 3$ à 5000 m).

La distribution des valeurs n'est pas gaussienne et la valeur moyenne n'est pas significative. C'est la raison pour laquelle **on caractérisera le comportement moyen d'une zone par la valeur médiane sur l'ensemble des points de mesures.**

La présence de fissures transversales sous la couche bitumineuse peut conduire :

- soit à des valeurs déclarées non significatives (si la mesure est à l'aplomb d'une fissure visible en surface, cas rarement rencontré),
- soit à une valeur de « Pseudo rayon de courbure » de l'ordre de 30 à 60% de la valeur nominale lorsque la mesure est réalisée au voisinage de la fissure transversale ou à l'aplomb sur le BB non fissuré. Cette situation peut être rencontrée statistiquement sur moins de 10 à 15% des mesures.

Une zone homogène sera caractérisée par :

- la valeur médiane du rayon (caractéristique de déformabilité moyenne),
- le % de valeurs de rayons inférieures ou supérieures aux seuils définis dans les « Logigrammes de Diagnostic » pour l'identification des « Cas type de structure résiduelle »,
- le(les) % de valeurs inférieures seuil(s) d'anomalie(s), ces % étant calculés par rapport à l'ensemble des mesures, y compris celles déclarées non significatives par le logiciel d'acquisition.

1.4 Interprétation et signification des valeurs mesurées.

Les seuils de signification du paramètre ne peuvent être définis qu'en fonction des structures auscultées, par une analyse paramétrique préalable de l'incidence des anomalies probables. En effet, si l'on considère le « rayon de courbure nominal » d'une structure saine, il peut varier de 1750 m à 4800 m suivant les structures neuves ([TC_i, PF_j] ; classes matériaux C_k) et de 1000 à 2500 m pour les chaussées renforcées..

Son interprétation doit en outre tenir compte de l'épaisseur bitumineuse en place (Hcs) et des conditions de température de cette couche lors des mesures (une température de surface inférieure à 25° C lors des mesures est conseillée pour faciliter l'interprétation).

1.4.1 Moyen de diagnostic pour les structures à assise traitée aux liants hydrauliques et mixtes - Anomalies de structure détectables

Ce paramètre étant plus sensible que le paramètre déflexion pour :

- les variations de qualité des couches traitées, en particulier de la partie supérieure des couches de base,
- les variations d'épaisseurs des assises en MTLH.

Il intervient fortement dans l'identification des Cas types de caractérisation de la structure résiduelle (logigrammes de diagnostic à partir des cas de grilles d'état de surface).

Mais son utilisation la plus discriminante pour la détection de défauts dans la structure est sous la forme du rapport « R' / R nominal » où « R' » est le rayon mesuré sur la structure avec anomalie) et « R nominal » le rayon de courbure calculé par le modèle ALIZE pour la structure nominale. Ce rapport « R' / R nominal » donne des indications sur la présence potentielle de certaines anomalies structurelles.

Il constitue donc un moyen non destructif de présomption des défauts de structure, le carottage en nombre limité devenant un moyen de confirmation(« autopsie sur des points de déformabilité anormale connue).

Une étude de tendance de l'incidence de défauts de structure sur la variabilité du paramètre « rayon de courbure » (dans les conditions usuelles de mesures, c'est à dire fréquence de 1 Hz et température de surface de 15 à 20°C soit E BB = 3150 MPa) illustre ce pouvoir discriminant

1.5 Moyen de modélisation du comportement de la structure.

Les épaisseurs et défauts de structure étant connus, la connaissance du couple associé de valeurs [Dm , Rm] permet un meilleur calage du modèle de la structure résiduelle vis à vis du comportement de l'entretien ultérieur :

- la déflexion servant à caler le module du support à partir d'un ordre de grandeur estimé du module des couches traitées,
- le rayon de courbure servant ensuite à ajuster les modules de fonctionnement des matériaux traités (avec les défauts en place).

1.6 Méthode de découpage en zones homogènes

On parlera plutôt d'un « sous découpage » en zones homogènes

1.6.1 Une première phase de découpage doit déjà avoir été faite à partir :

- de la connaissance de la structure,
- de la déformabilité en déflexion

1.6.2 Définition du Rayon nominal de la structure.

Pour chaque couple {structure nominale , déflexion} :

Modèle structure nominale

→ R nominal

- modalité de choix des caractéristiques pour le modèle :
 - H_{MTLH} : épaisseurs nominales,
 - E_{MTLH} : module GH conventionnel,
 - module BB à 1 Hz et T° de surface d'essai, on pourra retenir le plus souvent 3150 MPa pour T° de 15° à 20°C)

1.6.3 Détermination des seuils de rayon de courbure discriminant vis à vis d'anomalies types :

Le rayon discriminant d'une anomalie type est calculé à partir du ratio correspondant pris dans le tableau précédent.

exemple :

- Décohésion dans la partie supérieure de la couche de base
- $R'/R_{nominal} = 20\%$ → $R1 = 0,2 * R_{nominal}$
- anomalie type xx → R xx
- anomalie type yy → R yy

1.6.4 Découpage en « sous zones homogènes à partir de ces seuils correspondants à une potentialité d'anomalie type.

Avertissement préalable à la procédure de découpage: La représentation schéma-itinéraire du rayon de courbure apparaîtra toujours plus hétérogène que le graphe des déflexions.

A défaut de moyens automatiques fiables difficiles à appliquer (distribution des valeurs en générale non gaussienne), la procédure de découpage se fera sur le schéma-itinéraire par examen du graphe des rayons de courbure. Chaque tronçon sera ensuite caractérisé comme défini au §3 par :

- la valeur médiane du rayon (caractéristique de déformabilité moyenne)
- le(les) % de valeurs < seuil(s) d'anomalie(s), ces % étant calculé par rapport à l'ensemble des mesures, y compris celles déclarées non significatives par le logiciel d'acquisition.

2 Annexe 2 – Sondages¹⁸

2.1 Objectifs du sondage

Le sondage permet de définir la qualité des matériaux non traités en place (y compris le sol) et l'épaisseur effective des couches qui constituent la structure.

Vouloir obtenir une connaissance complète de ces données conduirait à réaliser une tranchée en continu sur toute la longueur de l'itinéraire.

En pratique, il est préférable de recourir à des sondages dont la fréquence d'implantation contribue à la fiabilité de l'information.

L'implantation des sondages se détermine à partir de la définition des zones réputées homogènes par :

- leur construction (connaissances bibliographiques)
- leur état de surface
- les caractéristiques des matériaux déterminés par des essais de laboratoire et notamment les essais de mesure de déflexion et de rayon de courbure.

L'implantation des sondages est donc une action préalable importante qui doit garantir une représentation suffisamment réaliste de la structure en place.

Les informations recherchées dans la réalisation de sondages sont les suivantes :

- épaisseurs des différentes couches à comparer avec les valeurs théoriques connues par les archives (tracé d'une coupe de chaussée montrant les variations d'épaisseur et les conditions de liaison des couches entre elles).
- nature et qualité des matériaux constitutifs de chaque couche de chaussée permettant d'apprécier la qualité résiduelle et l'évolution de ces matériaux, si l'on connaît les natures et qualités originelles.
- nature et caractéristiques du sol support en place.

2.2 Rappel réglementaire

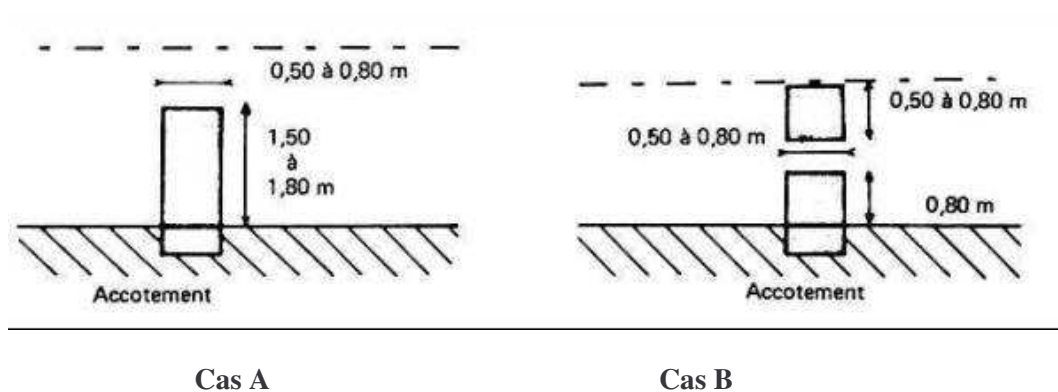
Toute intervention du type sondage ou carottage nécessite au préalable une déclaration d'intention de commencement de travaux (DICT).

2.2.1 Exécution d'un sondage :

Le sondage peut être exécuté de deux manières :

- soit en tranchée (cas A)
- soit en rive et/ou axe (cas B)

¹⁸ Guide d'auscultation des chaussées souples (1977) par P. Autret, M. Boutonnet, M. Brengarth, M. Dauzats, P. Diguat, B. Faure, M. Paillard et M. Siffert – Collection du LGPC



Cas A

Cas B

Quel que soit le cas choisi, le sondage doit déborder sur l'accotement afin de déterminer la largeur réelle de la structure de la chaussée.

Le sondage de type tranchée (cas A) permet dans le cas d'élargissements antérieurs de donner une coupe précise du profil en travers de la chaussée (largeur récupérable).

Le sondage rive et/ou axe (cas B), est préférable dans le cas où l'on désire connaître l'origine d'un comportement différent entre les bandes de roulement de rive et d'axe.

L'exécution d'un sondage nécessite les opérations suivantes :

- Opération N°1 : tracé de l'emplacement du sondage

La largeur minimale des sondages, de l'ordre de 50 cm sera fonction de la largeur du godet de la pelle mécanique, si on utilise cet engin.

Le découpage de la couche de roulement devra être fait avec une largeur supérieure de 10 cm à celle du godet.

Pour une chaussée à 2 voies (7 m de large), le sondage doit concerner environ 2 m de largeur de chaussée avec emprise sur l'accotement.

- Opération N°2 : découpage de la couche de roulement

A exécuter à la scie ou au marteau pneumatique afin d'éviter tout décollement de cette couche dans les zones adjacentes au sondage.

Dégager soigneusement à la pelle manuellement les matériaux de cette couche.

- Opération N°3 : « descente » du sondage

Elle doit s'effectuer couche par couche afin d'apprécier la qualité de chacune d'elles et éviter tout mélange de matériaux.

Pour chacune des couches : 2 phases :

- phase 1 : s'assurer de l'épaisseur de la couche en dégageant à la scie ou au marteau pneumatique un angle du sondage ;
- phase 2 : dégager à la pelle mécanique ou manuelle le reste de la couche. Les matériaux extraits au cours de cette seconde phase serviront au prélèvement d'échantillons et ne doivent pas être mélangés à ceux de la phase 1.

Le sol de fondation étant atteint, un prélèvement est fait dans le sol support.

- Opération N°4 : prélèvement d'échantillons

Ne pas utiliser les matériaux de la phase 1 précédente, car leur granularité peut être modifiée (formation de fines).

Pour chaque couche, homogénéiser les matériaux de la phase 2 et effectuer un quartage avant de prélever l'échantillon et de le placer dans un sac étanche étiqueté et fermé soigneusement.

Pour avoir une bonne représentativité, les échantillons doivent avoir un poids compris entre 200 D et 500 D (D = diamètre maximal des matériaux par couche).

Diamètre maximal D	200 D	500 D	Poids ou volume de l'échantillon
≤ 10 mm	2 kg	5 kg	≅ 5 kg ou 2,5 dm ³
10 < D ≤ 40	2 à 8 kg	5 à 20 kg	≅ 10 kg ou 5 dm ³
40 < D < 100	8 à 20 kg	20 à 50 kg	≅ 20 kg ou 10 dm ³
D ≥ 100	> 20 kg	50 kg	(*)

(*) compte tenu du volume de matériaux nécessaire, le nombre de ces prélèvements est limité au strict minimum.

- Opération N°5 : examen visuel du trou et relevé de la coupe

On doit observer en particulier la limite des différentes couches pour détecter d'éventuelles anomalies (venues d'eau, fluage).

- Opération N°6 : fermeture du sondage

Cette opération s'effectue en utilisant les matériaux extraits ou des matériaux d'apport et en les compactant par couches le mieux possible.

Sur les 20 cm supérieurs de remblaiement, on peut réaliser un sol ciment en place avec les matériaux extraits ou avec une grave 0/20 d'apport.

Dans tous les cas, on arrête le remblaiement à -10 cm et on réalise la fermeture par un béton bitumineux ou à défaut par de l'enrobé à froid

Les quantités de matériaux nécessaires au rebouchage dépendent du type de sondage et de la technique de rebouchage.

Pour information, avec un compresseur et un marteau pneumatique, la cadence journalière d'une équipe d'exécution et de rebouchage est de 5 à 7 sondages pour des chaussées à couches de surface bitumineuses de faibles épaisseurs. Pour des couches plus épaisses (> 8 cm), la cadence peut baisser à 4 ou 5 sondages par jour.

2.3 Prélèvements et analyses

Ces analyses se déroulent en 2 phases :

- d'une part, un examen visuel qui permet de donner une appréciation complétant le jugement global réalisé lors du sondage et de regrouper les prélèvements par familles ;
- d'autre part, des analyses de laboratoire sur des échantillons représentatifs des familles déterminées dans la première phase.

Les principaux essais à réaliser pour définir les caractéristiques de chaque famille sont :

- sur les matériaux de chaussée :
 - analyse granulométrique, propreté (MB ou PS) ou teneur en eau éventuelle.
- Sur sol support :
 - les essais permettant son classement (norme NF P11-300) suivant le GTR et de déterminer sa teneur en eau ;
 - un prélèvement de sol support est réalisé à chaque sondage et conditionné en sacs étiquetés et étanches ;
 - les prélèvements sont examinés visuellement et classés par famille (de même caractéristiques visuelles) ;
 - par famille, le nombre d'échantillons à analyser est donné par le tableau ci-après :

Prélèvements de la famille	≤ 5	5 à 10	≥ 10
Échantillons analysés	1 (*)	2 (**)	3 (**)

(*) Dans ce cas, les prélèvements sont mélangés et quartés pour avoir un échantillon moyen représentatif de la famille

(**) Obtenus chacun par regroupement de la moitié ou du tiers des prélèvements.

Pour les sols support, la teneur en eau doit être mesurée sur chaque prélèvement.

2.4 Cas spécifique des traverses

Les sondages en traverses d'agglomération doivent tenir compte de l'existence des réseaux.

Une collaboration avec les différents gestionnaires et concessionnaires (DICT) est indispensable. Un plan de récolement précis permettra d'optimiser l'implantation des essais.

Par ailleurs, afin de limiter la gêne à l'utilisateur et aux riverains et les risques de dégradation accidentels des réseaux, le nombre de carottes et de sondages est sensiblement réduit.

3 Annexe 3 – Carottages¹⁹

3.1 Objectifs du carottage

L'essai de carottage consiste à découper et à extraire d'une chaussée un échantillon cylindrique appelé carotte.

L'observation visuelle de la carotte et de la paroi de la cavité permet de connaître la nature et l'état des matériaux.

On déduit de cet essai les caractéristiques suivantes :

- pour chaque couche de matériaux, l'épaisseur E_p , l'indice d'état du matériau IEM et si une fissure traverse la carotte, l'indice d'état de la fissure IEF ;
- pour chaque interface, l'indice IEI d'état de l'interface.

Les couches et interfaces sont numérotées en ordre croissant du haut vers le bas.

3.2 Conditions d'exécution des carottages :

Le carottage doit être effectué perpendiculairement à la chaussée et pratiquement l'inclinaison par rapport à cette perpendiculaire doit être inférieure à 10° .

Le carottier doit être adapté au matériau à carotter : la poussée verticale sur l'outil, la vitesse de rotation et le débit d'eau sont à choisir en fonction du carottier et de l'état de cohésion des couches de la chaussée.

La carotteuse et les carottiers doivent être en bon état de sorte que l'opération de carottage ne soit pas à l'origine d'une dégradation anormale de la carotte ou de la cavité.

3.3 Conditions d'observation des carottes :

La carotte extraite de la cavité est reconstituée dans un coffret. L'observation porte sur les dimensions, l'état d'intégrité de la carotte et sur l'apparence de la paroi de la cavité de carottage.

En fonction de ces observations, on note chaque couche et chaque interface selon la codification ci-après :

¹⁹ méthode d'essai LPC N° 43

Notation des indices de carottage

<p>Note d'une couche de roulement IEM</p>	<p>Nombre à 1 chiffre de 0 à 6 Selon tableau A</p>
<p>Note d'une couche d'assise traitée IEM</p>	<p>Nombre à 3 chiffres dont chacun varie de 0 à 6 - le premier chiffre caractérise l'état des 5 cm supérieurs de la couche - le second chiffre traduit l'état de la partie intermédiaire de la couche - le troisième chiffre caractérise l'état des 5 cm inférieurs de la couche Selon tableau A</p>
<p>Note d'une interface IEI</p>	<p>Nombre à 1 chiffre de 0 à 5 Selon tableau B</p>
<p>Note d'une fissure IEF</p>	<p>Nombre à 1 chiffre de 0 à 5 Selon tableau C</p>

Tableau A : Règles pour établir la note d'une couche traitée IEM

Aspect	Observations et Conclusions	Indice hydraulique	Couche bitumineuse	Indice
	<p>Carotte intacte Découpe franche <u>Très bonne tenue</u></p>	TTBO	CTBO	0
	<p>Carotte intacte Découpe avec quelques arrachements <u>Bonne tenue</u></p>	TBON	CBON	1
	<p>Carotte intacte Découpe avec nombreux arrachements Sur couche bitumineuse, rupture carotte possible à la main, aspect rupture terne de matériaux oxydés dans la masse <u>Tenue médiocre</u></p>	TMED	CMEC	2
	<p>Carotte en deux parties Découpe franche, ou avec arrachements au niveau de la rupture Les 2 faces de la rupture sont lisses <u>Feuilletage</u></p>	FEUIL		3
	<p>Couches présentant au carottage des fragments engrenés Découpe franche, ou avec quelques arrachements Eventuellement traces de fines sur les lèvres <u>Fracturation sous trafic</u></p>	FRAC		4
	<p>Couche détruite partiellement ou en totalité au carottage Découpe avec arrachements Extraction de fragments non engrenés (allure de rognon de GH prise) et de granulats <u>Fracturation au carottage</u> <u>Tenue faible</u></p>	TFAI	CFAI	5
	<p>Couche détruite au carottage Découpe avec formation de cavités, granulats se descellant souvent à la main Matériaux totalement dissociés, extraction de granulats et de fines <u>Matériaux désagrégés en place ou à résistance très faible</u></p>	MADI	MADI	6

Tableau B : Règles pour établir la note d'une interface IEI

Indice	Liaison couches GH/GH	Liaison couches Bitum/GH	Liaison couches Bitum/Bitum	Observations et Conclusions
0	BACC	BACC	BACC	Carotte intacte après extraction Découpe franche ou avec arrachements au niveau de la liaison Liaison résistant aux manipulations <u>Bon accrochage – Bonne liaison</u>
1	MACC	MACC	MACC	Carotte intacte après extraction Découpe franche ou avec arrachements au niveau de la liaison Liaison rompue après extraction lors de manipulations <u>Mauvais accrochage – Liaison assez bonne</u>
2		LFRA	LFRA	Carotte en 2 parties : liaison détruite au carottage Découpe franche ou avec arrachements au niveau de la liaison <i>"Ponts de bitume" non oxydés brillants visibles sur les 2 faces de l'interface rompu</i> <u>Liaison fragile</u>
3	LFRA-RUPT	LFRA-RUPT		Carotte en 2 parties : liaison détruite au carottage Découpe franche ou avec arrachements au niveau de la liaison Granulats de la GH accrochés au BB ou à la GH <u>Liaison fragile – Rupture MTLH</u>
4	DECO	DECO	DECO	Carotte en 2 parties : liaison détruite au carottage Découpe franche au niveau de la liaison Les 2 faces de l'interface rompu sont lisses <i>Aucun "Ponts de bitume" non oxydés brillants visibles sur les 2 faces de l'interface rompu</i> Éventuellement traces de pollution par des fines <u>Décollement</u>
5	MADI	MADI	MADI	Carotte en 2 parties : liaison détruite au carottage Découpe avec formation d'une cavité au niveau de la liaison et érosion des bords des deux couches carottées au niveau de la liaison <u>Matériaux fragiles ou désagrégés en place près de l'interface</u>

Tableau C : Règles pour établir la note d'une fissure IEF

État fissure sur carotte	État fissure sur paroi	Indice
Unique et franche	Unique et franche	0
	Dédoublee (*)	0
	Départ de matériau sur des bords	3
Dédoublee	Unique et franche (*)	1
	Dédoublee	2
	Départ de matériau sur des bords	4
Désagrégation des bords	Unique et franche	1
	Dédoublee	3
	Départ de matériau sur des bords	5

(*) : Cas contradictoires donc peu probables – Priorité à l'information la plus probable

3.4 Modes opératoires du carottage :

Trois modes opératoires sont définis, désignés par C1, C2, C3 :

- C1 : Contrôle de l'épaisseur
- C2 : analyse des couches et des interfaces
- C3 : analyse des fissures

Méthode	C1	C2	C3
Paramètres relevés par couche	Épaisseurs et nature de chaque couche	- nature du matériau - épaisseurs - état des couches traitées IEMi - état des interfaces IEIj	- nature du matériau - épaisseurs - état des fissures par couche IEFi
Implantation des essais	Au moins 1 carottage / 250 m dans l'axe d'une voie	Au moins 4 carottes par section et au moins 1 carotte / 50 m à plus de 75 cm d'une fissure transversale et 35 cm d'une fissure longitudinale dans et hors bandes de roulement	Au moins 2 carottes par section. Si fissures transversales : 1 carotte / fissure
Caractéristiques des appareils d'essai	Bon état de la carotteuse et carottiers * ($\varnothing \geq 90$ mm)	Bon état de la carotteuse et carottiers * ($\varnothing \geq 140$ mm)	Bon état de la carotteuse et carottiers * ($\varnothing \geq 140$ mm)
Déroulement de l'essai	4 phases : 1- mise en place carotteuse 2- exécution carottage 3- extraction carotte 4- observation carotte et cavité (photos)		
Exploitation des essais	Relever : - la position longitudinale de l'essai (PR, profil) - la position transversale /bord de rive ou /bord externe de la bande blanche Par section homogène (ou sous-section si hétérogénéité) - Moyenne et écart type de l'épaisseur de chaque couche	Relever : - la position longitudinale de l'essai (PR, profil) - la position transversale /bord de rive ou /bord externe de la bande blanche Par section homogène (ou sous-section si hétérogénéité) et pour chaque couche : - épaisseur moyenne et écart type <u>si nbr =2</u> - note = max (notes) <u>si nbr > 2 et maximum unique</u> - note = note de rang 2 <u>si nbr > 2 et 2 valeurs max</u> - note = max (notes) - interfaces : <u>si nbr =2</u> - note = max (notes) <u>si nbr > 2 et maximum unique</u> - note = note de rang 2 <u>si nbr > 2 et 2valeurs max</u> - note = max (notes)	Relever : - la position longitudinale de l'essai (PR, profil) - la position transversale /bord de rive ou /bord externe de la bande blanche Par section homogène (ou sous-section si hétérogénéité) et pour chaque couche : - épaisseur moyenne et écart type - fissures <u>si nbr =2</u> - note = max (notes) <u>si nbr > 2 et maximum unique</u> - note = note de rang 2 <u>si nbr > 2 et 2 valeurs max</u> - note = max (notes)

(*) L'opération de carottage ne doit pas être à l'origine d'une dégradation anormale de la carotte ou de la cavité, ce qui générerait ou rendrait imprécises les mesures d'épaisseur.

(**) Dans le cas de chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, il est recommandé d'interrompre l'opération de carottage lorsque l'interface revêtement / base est atteinte (changement de couleur des boues rejetées). Arrêter la carotteuse et tester le collage du revêtement sur l'assise avant de reprendre l'opération.

3.5 Exemple de présentation de résultats de carottage :

3.5.1 Essai de caractérisation des couches traitées et interfaces d'une chaussée semi-rigide

Identification d'un essai

Effectué par :	LRPC de Lille
Type de carotteuse	CECP Angers
Diamètre extérieur du carottier	151 mm
Département	59
Route	RD 12
Sens	+
Voie	Lourde
Date de l'essai	15 mai 1995
Température ambiante	15°C
PR + abscisse de l'essai	2 + 552
Distance au bord droit de la chaussée	3,10 m
Type de structure	Semi-rigide
Nombre de couches traitées	3
Remarques (matériel, climat, repérage, etc..)	Temps sec, numéro de terrain 2

Résultat d'un essai

Couche n° 1	Epaisseur (cm)	8
	Nature matériaux	BB
	Etat de la carotte	Intacte
	Etat de la paroi	Découpe franche
	Notation	0
Interface n° 1	Etat sur la carotte	Décollée
	Etat sur la paroi	Découpe franche
	Notation	2
Couche n° 2	Epaisseur (cm)	15
	Nature matériaux	GH
	Etat de la carotte	Intacte
	Etat de la paroi	Qcq arrach ^{ts} en haut de couche
	Notation	100
Interface n° 2	Etat sur la carotte	Collée
	Etat sur la paroi	Découpe franche
	Notation	0
Couche n° 3	Epaisseur (cm)	15
	Nature matériaux	GH
	Etat de la carotte	Intacte
	Etat de la paroi	Découpe franche
	Notation	000
Général	Commentaires divers	

3.5.2 Présentation des résultats sur un section homogène :

4 carottages « hors fissure » ont été réalisés et pris en compte

Identification de la section homogène

Route	RD 12
Sens	+
Voie	Lourde
PR + abscisse début de section	0 + 000
Pr + abscisse fin de section	0 + 841
Type de structure	Semi-rigide
Nombre de couches traitées	3
Nombre d'essais pris en compte	4
Fichier premier essai	CAR15D12.310
Fichier deuxième essai	CAR15D12.311
Fichier troisième essai	CAR15D12.312
Fichier quatrième essai	CAR15D12.313
Remarques	Néant

Résultats sur la section homogène

Couche n° 1	Épaisseur moyenne(cm)	8
	Écart type sur épaisseur (cm)	1
	Nature matériau	BB
	Notation	0
Interface n°1	Notation	2
Couche n°2	Épaisseur (cm)	15
	Écart type sur épaisseur (cm)	1
	Nature matériau	GH
	Notation	000
Interface n°2	Notation	0
Couche n°3	Épaisseur (cm)	15
	Écart type sur épaisseur (cm)	1,5
	Nature matériau	GH
	Notation de synthèse	000

3.6 Cas spécifique des traverses

Les carottages en traverses d'agglomération doivent tenir compte de l'existence des réseaux.

Une collaboration avec les différents gestionnaires et concessionnaires (DICT) est indispensable. Un plan de récolement précis permettra d'optimiser l'implantation des essais.

Par ailleurs, afin de limiter la gêne à l'utilisateur et aux riverains et les risques de dégradation accidentels des réseaux, le nombre de carottes et de sondages est sensiblement réduit.

4 Annexe 4 - Caractéristiques mécaniques des matériaux de référence

4.1 Matériaux bitumineux

nom	E en MPa (10°c ; 10Hz)	E en MPa (15°c ; 10Hz)	nu	$\epsilon_6 \cdot 10^6$ (10° C ; 25 Hz)	-1/b	SN	Sh (m)	Kc
BBSG	7200	5400	0.35	100 (*)	5	0.25	**	1.1
BBDr	4000	3000	0.35	/	/	/	**	/
BBME	12000	9000	0.35	/	/	/	**	/
GB1	9000	7000	0.35	70	5	0.4	**	1.3
GB2	12300	9300	0.35	80	5	0.3	**	1.3
GB3	12300	9300	0.35	90	5	0.3	**	1.3
GB4	14550	11000	0.35	100	5	0.3	**	1.3
EME1	17000	14000	0.35	100	5	0.3	**	1
EME2	17000	14000	0.35	130	5	0.25	**	1

(*) sauf dans le cas des chaussées souples ou $\epsilon_6 = 150 \cdot 10^{-6}$

(**) Sh dépend de l'épaisseur totale d'assise mise en œuvre :

$Sh = 0,01 \text{ m}$ si $h < 0,10 \text{ m}$

$Sh = 0,01 + 0,3 \times (h - 0,1)$ si $0,1 \text{ m} \leq h \leq 0,15 \text{ m}$

$Sh = 0,025 \text{ m}$ si $h > 0,15 \text{ m}$

4.2 Matériaux traités aux liants hydrauliques

nom	E (MPa)	nu	σ_6 (MPa)	-1/b	SN	Sh (m)	Kc neuf	Kc renf.	Kd
GC3	23000	0.25	0.75	15	1	0.03	1.4	1.7	1
GC4	25000	0.25	1.2	15	1	0.03	1.4	1.7	***
GCV	30000	0.25	1.4	16	1	0.03	1.5	1.7	0.8
GLg	15000	0.25	0.6	12.5	1	0.03	1.5	1.7	1
GLp	20000	0.25	0.7	13.7	1	0.03	1.5	1.7	1
GLp chaud	15000	0.25	0.6	12.5	1	0.03	1.5	1.7	1
GLr	23000	0.25	0.75	15	1	0.03	1.4	1.7	1
SC3	17200	0.25	0.75	12	0.8	0.025	1.5	1.7	1
SC2	12000	0.25	0.5	12	0.8	0.025	1.5	1.7	1
SC1	5000	0.25	0.21	12	0.8	0.025	1.5	1.7	1
SL3	12500	0.25	0.65	10	0.8	0.025	1.5	1.7	1
SL2	8500	0.25	0.425	10	0.8	0.025	1.5	1.7	1
SL1	3700	0.25	0.175	10	0.8	0.025	1.5	1.7	1

(***) $Kd = 1$ si la mise en œuvre est faite en deux couches avec réalisation d'un enduit de cure sur la première

$Kd = 0,8$ dans les autres cas

4.3 Matériaux retraités à froid aux liants hydrocarbonés

Classe de retraitement	Caractéristiques	Module à 15°C et Rc Duriez (14j) à considérer pour le matériau retraité
I	Essai DURIEZ : $r/R \geq 0,55$ $Rt (14j) \geq 1,4 \text{ MPa}$	$E = 1\,500 \text{ MPa}$ si $1,5 < Rc < 2,2 \text{ MPa}$ $E = 2\,500 \text{ MPa}$ si $2,2 < Rc < 3 \text{ MPa}$
II Avec 75 à 90 % d'agrégat bitumineux dans le matériau	Essai DURIEZ : $r/R \geq 0,65$ $Rt (14j) \geq 1,4 \text{ MPa}$ $\% \text{ vides} \leq 15 \%$ Essai PCG : $\% \text{ vides} \leq 25 \%$ à 100 girations	$E = 2\,000 \text{ MPa}$ si $Rc < 4 \text{ MPa}$ $E = 3\,000 \text{ MPa}$ si $Rc \geq 4 \text{ MPa}$
II Avec plus de 90 % d'agrégat bitumineux dans le matériau	Essai DURIEZ : $r/R \geq 0,65$ $Rt (14j) \geq 3 \text{ MPa}$ $\% \text{ vides} \leq 15 \%$ Essai PCG : $\% \text{ vides} \leq 25 \%$ à 100 girations	$E = 3\,000 \text{ MPa}$ si $Rc < 4 \text{ MPa}$ $E = 4\,000 \text{ MPa}$ si $Rc \geq 4 \text{ MPa}$
III	Essai DURIEZ : $r/R \geq 0,7$ $Rt (14j) \geq 5 \text{ MPa}$ $\% \text{ vides} \leq 14 \%$ Essai PCG : $\% \text{ vides} \leq 25 \%$ à 100 girations	$E = 4\,000 \text{ MPa}$

4.4 Matériaux retraités à froid aux liants hydrauliques

Valeurs indicatives des paramètres de dimensionnement pour des matériaux comprenant entre 10 et 20 % de matériaux bitumineux

	Cas de chantier			
	Qualité de retraitement R1		Qualité de retraitement R2	
	Matériau M1	Matériau M2	Matériau M1	Matériau M2
Module (Mpa)	20 000	18 000	18 000	13 000
σ_6 (Mpa)	0,70	0,55	0,55	0,35
Pente (-1/b)	16	16	16	16
Dispersion en fatigue (S_N)	1	1,5	1,5	1,5
Dispersion sur l'épaisseur (Sh)	3*	3*	5	5

*Valeur valable uniquement s'il y a reprofilage avant retraitement. Sinon, prendre $Sh = 4$

Lexique

En cours de rédaction

D_{moy}	déflexion moyenne
D_{pic}	déflexion moyenne des valeurs mesurées en bord de fissure (pics)
D_{centre}	déflexion moyenne des valeurs (hors pics)
R_c	rayon de courbure caractéristique
$R_{\text{méd}}$	rayon de courbure médian à partir des valeurs mesurées (50% des valeurs mesurées R_c sont inférieures à $R_{\text{méd}}$)
R_{cal}	rayon de courbure calculé à partir de la structure théorique modélisée
MTLH	Matériau Traité au liants hydrauliques
P_i	Profondeur de fissuration qualifiée selon 4 états – cf § Investigations sections témoins – chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, mixtes, inverses
FT	Fissure Transversale
FL	Fissure Longitudinale
MB	Matériaux Bitumineux
GNT	Grave Non Traité
PTAC	Poids Total Autorisé en Charge
TC_j	Trafic Cumulé de classe j
d	Durée de service (en années)
r	Taux de croissance linéaire annuel du trafic à la mise en service
q	Taux de croissance linéaire annuel du trafic à la mise en service
TN	Terrain Naturel
OA	Ouvrage d'Art
MO	Maître d'Ouvrage
T_i	Trafic routier de classe i
GB	Grave Bitume
EME	Enrobé à Module Elevé
MJA	Trafic Moyen Journalier Annuel par sens sur la voie circulée la plus chargée
E	Module du matériau

$E_{\text{mesuré}}$	Module du matériau obtenu par essai sur carotte
BDR	Bande De Roulement
MNT	Matériaux non traités

Bibliographie

Respecter les consignes établies par le service documentation pour la rédaction de ces références.

Faire valider votre biblio par le service documentation.

[style : Texte_biblio]

[style : couv4_Resume]

Le résumé rapportera les objectifs du guide ou de l'étude, les résultats les plus significatifs et les conclusions. 25 lignes maximum

Il doit être compréhensible sans recours au texte et sera constitué de phrases complètes dont le vocabulaire est identique à celui employé dans le rapport. Les abréviations, renvois en bas de page et références ne seront pas utilisés dans le résumé.

L'auteur devra dès la rédaction en français fournir une traduction des titre, sous-titre et résumé en anglais afin d'alimenter la base de données documentaire.

Document disponible au bureau de vente du Sétra
46 avenue Aristide Briand – BP 100 – 92225 Bagneux Cedex – France
téléphone : 33(0)1 46 31 53 – télécopie : 33 (0)1 46 11 33 55

Référence : xxxxxx Prix : xx €

Couverture, crédit photo : **XXXXXXA compléter par l'auteur**

L'autorisation du Sétra est indispensable pour la reproduction même partielle de ce document.