

L'ENTRETIEN STRUCTUREL DES CHAUSSÉES SOUPLES ET SEMI-RIGIDES

Le retraitement en place à froid aux liants hydrauliques



**L'ENTRETIEN STRUCTUREL DES CHAUSSÉES
SOUPLES ET SEMI-RIGIDES**

Le retraitement en place à froid
aux liants hydrauliques

Ce document a été rédigé par **Joseph ABDO**, directeur délégué Routes **Cimbéton**,
et validé par un Groupe de Travail constitué de :

Ludovic CASABIEL	CIMENTS VICAT
David CUINET	LAFARGE CIMENTS
Frédéric DIDIER	HOLCIM CIMENTS
Jean-Philippe LEHOUX	CIMENTS CALCIA

Avant-propos

● Le réseau routier français se compose à 95 % de chaussées souples et semi-rigides. Du fait de l'accroissement constant du trafic routier, notamment du trafic lourd, de nombreuses routes sont en mauvais état et doivent être réhabilitées.

Face aux techniques traditionnelles de reconstruction ou de renforcement avec décaissement partiel de la structure de la chaussée, la technique du retraitement en place à froid aux liants hydrauliques offre une alternative économique, pérenne et écologique pour l'entretien structurel des chaussées dégradées.

Avec l'impulsion "écologiste" et l'approche actuelle du développement durable, un nouveau contexte apparaît. Les facteurs et les éléments moteurs qui orientent l'entretien et la réhabilitation des chaussées vers des techniques alternatives propres, économes en granulats d'apport et en énergie telles que la technique de retraitement des chaussées en place à froid aux liants hydrauliques sont :

- la prise en compte de l'amélioration du cadre de vie et de la protection de l'environnement,
- les nouvelles réglementations et taxes concernant la mise en décharge,
- la raréfaction des ressources naturelles dans certaines régions, leur éloignement des chantiers, la difficulté croissante de leur extraction (respect de l'environnement),
- le gisement considérable en ressources représenté par le réseau existant d'infrastructures routières,
- l'augmentation des coûts de transport.

L'objet de ce guide est de présenter une synthèse des connaissances et des règles de l'art relatives à la technique de retraitement des chaussées en place à froid aux liants hydrauliques.

Sommaire

I - Introduction	13
1.1 - Besoin de construire des routes	14
1.2 - Besoin d'entretenir les routes	15
1.3 - Construire et entretenir : Oui, mais pas à n'importe quel prix	16
1.4 - Le retraitement des chaussées en place à froid aux liants hydrauliques	17

2 - Présentation du gisement	19
2.1 - Le réseau routier français : un gisement important de matériaux	20
2.2 - Le réseau routier français : un patrimoine considérable	20
2.3 - Le réseau routier français : un gisement facilement valorisable	21
2.3.1 - Le réseau des autoroutes concédées et non concédées	22
2.3.1.1 - Les chaussées bitumineuses	22
2.3.1.2 - Les chaussées à structure mixte	23
2.3.1.3 - Les chaussées en béton	23
2.3.2 - Le réseau des Routes Nationales	23
2.3.2.1 - Les chaussées bitumineuses	24
2.3.2.2 - Les chaussées à structure mixte	24
2.3.2.3 - Les chaussées à structure mixte inversée	25
2.3.2.4 - Les chaussées en béton	25
2.3.2.5 - Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	26
2.3.3 - Le réseau des Routes Départementales	26
2.3.3.1 - Les chaussées souples	27
2.3.3.2 - Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	27
2.3.3.3 - Les chaussées à structure mixte	28
2.3.3.4 - Les chaussées à structure mixte inversée	28
2.3.3.5 - Les chaussées en béton	29
2.3.4 - Le réseau des Routes communales et rurales	29
2.3.4.1 - Les chaussées souples	30
2.3.4.2 - Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	30
2.3.4.3 - Les chaussées à structure mixte	31
2.3.4.4 - Les chaussées pavées ou dallées	31
2.3.4.5 - Les chaussées en béton	31
2.4 - Le réseau routier français : évaluation du gisement potentiel	32

3 - Les liants	35
3.1 – Les ciments	36
3.2 – Les Liants Hydrauliques Routiers (LHR)	37
3.2.1 – Objectifs	37
3.2.2 - Types de LHR	37
3.2.3 - Codification et spécifications performantielles des LHR	37
3.2.4 - Identification des LHR	38
3.3 – Les chaux	39

4 - Technique de retraitement	41
4.1 - Quatre opérations essentielles	42
4.1.1 - La fragmentation	42
4.1.2 - L'épandage	43
4.1.3 - Le traitement	44
4.1.4 - Le compactage et la préfissuration	45
4.1.5 - La finition	46
4.2 - La classe de retraitement	46

5 - Études préalables	47
5.1 - La faisabilité technique du retraitement	48
5.1.1 - La reconnaissance de la chaussée	49
5.1.2 - Le prélèvement d'échantillons représentatifs	50
5.1.3 - La caractérisation des matériaux prélevés	50
5.1.3.1 - <i>Identification de la nature des matériaux</i>	51
5.1.3.2 - <i>Identification de l'état hydrique des matériaux</i>	51
5.1.3.3 - <i>Identification d'éventuels produits inhibiteurs de prise</i>	52
5.1.4 - Etude de laboratoire	52
5.1.4.1- <i>La définition du mode de retraitement</i>	53
5.1.4.2- <i>L'évaluation des caractéristiques mécaniques des matériaux retraités</i>	54
5.1.4.3 - <i>Etude de formulation</i>	55
5.2 - Analyse économique et environnementale	57

6 - Le matériel de retraitement de chaussées	59
6.1 - Le matériel de retraitement : description et critères de performances	61
6.1.1 - Epanchage du liant : description et critères de performances	61
6.1.1.1 - Les épandeurs : description	61
6.1.1.2 - Les épandeurs : critères de performances	62
6.1.2 - Machine de retraitement : description et critères de performances	63
6.1.2.1 - Les machines de retraitement : description	65
6.1.2.2 - Les machines de retraitement : critères de performances	67
6.1.3 - Le matériel de retraitement : niveaux de qualité	67
6.2 - Le matériel de compactage : description et critères de performances	69
6.2.1 - Le matériel de compactage : description	69
6.2.2 - Le matériel de compactage : niveaux de qualité	71
6.3 - Les prescriptions relatives à un chantier de retraitement	71
6.4 - Protection de la surface contre la dessiccation	72
6.5 - Préfissuration	73

7 - Le dimensionnement	77
7.1 - La méthode de dimensionnement	78
7.1.1 - Le trafic	79
7.1.1.1 - Détermination du trafic à la mise en service	79
7.1.1.2 - Classes de trafic	81
7.1.1.3 - Détermination du trafic cumulé «N»	82
7.1.2 - Choix de la couche de roulement	83
7.1.3 - Modélisation de la portance du sol support et, le cas échéant, de la partie conservée de l'ancienne chaussée	84
7.1.4 - Définition de la classe de résistance des matériaux retraités	84
7.1.5 - Calcul des contraintes admissibles	85
7.1.5.1 - Coefficient de calage	85
7.1.5.2 - Risque	86
7.1.5.3 - Les paramètres de fatigue	86
7.1.6 - Modélisation de la structure	87
7.2 - Justification de la structure	87
7.3 - Le contrôle du dimensionnement	90
7.4 - Résistance au gel et au dégel	90
7.4.1 - Choix de l'hiver de référence	91
7.4.2 - Calcul de l'indice de gel admissible IA	91
7.4.2.1 - Évaluation de la susceptibilité au gel de la plate-forme	92
7.4.2.2 - Analyse de nature mécanique, calcul de Q_M	93
7.4.2.3 - Quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme	93
7.4.2.4 - Evaluation de la protection thermique apportée par la structure de chaussée	94
7.4.2.5 - Détermination de l'indice de gel atmosphérique admissible IA	96
7.4.3 - Comparaison entre l'indice de gel de référence IR et l'indice de gel admissible IA	97

8 - Exemples de dimensionnement	99
8.1 - Premier projet	100
8.1.1 - Évaluation du trafic cumulé « TC »	100
8.1.1.1 - Trafic à la mise en service « t »	100
8.1.1.2 - Trafic moyen journalier annuel (MJA) à la mise en service	101
8.1.1.3 - Trafic « t » à la mise en service	101
8.1.1.4 - Détermination du trafic cumulé « TC »	101
8.1.2 - La structure de chaussée en place	102
8.1.2.1 - La constitution de la structure existante	102
8.1.2.2 - Les caractéristiques de la structure existante	102
8.1.3 - Les hypothèses de dimensionnement	103
8.1.4 - Solution d'entretien avec le retraitement en place au liant hydraulique	103
8.1.4.1 - La caractérisation des matériaux en place	103
8.1.4.2 - Le dosage en liant	103
8.1.4.3 - Le choix du niveau de qualité du retraitement	103
8.1.4.4 - Les paramètres de calcul de dimensionnement	104
8.1.4.5 - Le dimensionnement de la structure retraitée	104
8.1.4.6 - Méthodologie de reprise	104
8.1.4.7 - Modélisation de la structure retraitée	105
8.1.4.8 - Hypothèses d'interface	105
8.1.4.9 - Vérification du dimensionnement	105
8.1.5 - Solution de reconstruction en matériaux bitumineux	106
8.1.5.1 - Méthodologie de reprise	106
8.1.5.2 - Résultats du dimensionnement	106
8.2 - Deuxième projet	108
8.2.1 - Évaluation du trafic cumulé « TC »	108
8.2.1.1 - Trafic à la mise en service « t »	108
8.2.1.2 - Trafic moyen journalier annuel (MJA) à la mise en service	108
8.2.1.3 - Trafic « t » à la mise en service	109
8.2.1.4 - Détermination du trafic cumulé « TC »	109
8.2.2 - La structure de chaussée en place	110
8.2.2.1 - La constitution de la structure existante	110
8.2.2.2 - Les caractéristiques de la structure existante	110
8.2.2.3 - L'indice de gel admissible de la structure existante	110
8.2.3 - Les hypothèses de dimensionnement	111
8.2.4 - Solution d'entretien avec le retraitement en place au liant hydraulique	111
8.2.4.1 - La caractérisation des matériaux en place	112
8.2.4.2 - Le dosage en liant	112
8.2.4.3 - Le choix du niveau de qualité du retraitement	112
8.2.4.4 - Les paramètres de calcul de dimensionnement	112
8.2.4.5 - Le dimensionnement de la structure retraitée	113

8.2.4.6 - Méthodologie de reprise	113
8.2.4.7 - Modélisation de la structure retraitée	113
8.2.4.8 - Hypothèses d'interface	114
8.2.4.9 - Vérification du dimensionnement	114
8.2.4.10 - Dimensionnement au gel de la structure retraitée en place	114
8.2.5 - Solution de reconstruction en matériaux bitumineux	115
8.2.5.1 - Méthodologie de reprise	115
8.2.5.2 - Résultats du dimensionnement	115
8.2.5.3 - Dimensionnement au gel de la structure bitumineuse	115
8.3 - Troisième projet	118
8.3.1 - Évaluation du trafic cumulé « TC »	118
8.3.1.1 - Trafic à la mise en service « t »	118
8.3.1.2 - Trafic moyen journalier annuel (MJA) à la mise en service	118
8.3.1.3 - Trafic « t » à la mise en service	119
8.3.1.4 - Détermination du trafic cumulé « TC »	119
8.3.2 - La structure de chaussée en place	120
8.3.2.1 - La constitution de la structure existante	120
8.3.2.2 - Les caractéristiques de la structure existante	120
8.3.2.3 - L'indice de gel admissible de la structure existante	121
8.3.3 - Les hypothèses de dimensionnement	122
8.3.4 - Solution d'entretien avec le retraitement en place au liant hydraulique	123
8.3.4.1 - La caractérisation des matériaux en place	123
8.3.4.2 - Le dosage en liant	123
8.3.4.3 - Le choix du niveau de qualité du retraitement	123
8.3.4.4 - Les paramètres de calcul de dimensionnement	124
8.3.4.5 - Le dimensionnement de la structure retraitée	124
8.3.4.6 - Méthodologie de reprise	124
8.3.4.7 - Modélisation de la structure retraitée	125
8.3.4.8 - Hypothèses d'interface	125
8.3.4.9 - Vérification du dimensionnement	125
8.3.4.10 - Dimensionnement au gel de la structure retraitée en place	125
8.3.5 - Solution de reconstruction en matériaux bitumineux	126
8.3.5.1 - Méthodologie de reprise	126
8.3.5.2 - Résultats du dimensionnement	126
8.3.5.3 - Vérification du dimensionnement	127
8.3.5.4 - Dimensionnement au gel de la structure bitumineuse	127
8.4 - Choix de la solution d'entretien	129
8.4.1 - La comparaison économique	129
8.4.1.1 - La méthodologie de l'évaluation	129
8.4.1.2 - Les résultats comparatifs	130
8.4.2 - La comparaison environnementale	130
8.4.2.1 - La méthodologie de l'évaluation	130
8.4.2.2 - Les résultats comparatifs	132

9 - Démarche de qualité et contrôles	135
9.1 - Objectifs essentiels de l'assurance qualité	136
9.2 - Facteurs de succès d'un chantier de retraitement	137
9.2.1 - Travaux de préparation	137
9.2.2 - Épandage	138
9.2.3 - Malaxage	138
9.2.4 - Régalage	139
9.2.5 - Pré-compactage	139
9.2.6 - Pré-fissuration	140
9.2.7 - Réglage	140
9.2.8 - Compactage final	140
9.2.9 - Protection du matériau	141
9.3 - L'assurance qualité	141
9.3.1 - Définition de la qualité requise	141
9.3.2 - Plan de contrôle	141
9.3.3 - Points sensibles	142
9.3.4 - Points d'arrêt	143

10 - Conclusion	147
------------------------	------------

11 - Bibliographie	149
---------------------------	------------

12 - Normes	151
--------------------	------------

13 - Abréviations & symboles	159
---	------------

Introduction

- 1.1 - Besoin de construire des routes**
- 1.2 - Besoin d'entretenir des routes**
- 1.3 - Construire et entretenir :
Oui, mais pas à n'importe quel prix**
- 1.4 - Le retraitement des chaussées en
place à froid aux liants hydrauliques**

1.1 - Besoin de construire des routes

Il est devenu incontestable que le développement économique passe par le développement des moyens de communication et qu'à ce titre, les infrastructures de transport jouent un rôle majeur.

La construction et l'entretien d'un réseau de transport moderne et cohérent mobilisent des quantités importantes de matériaux. En France, la consommation annuelle s'élève en effet à environ 200 millions de tonnes. Le caractère assez restrictif des spécifications routières fait que seules certaines catégories de matériaux sont couramment utilisées. Ce sont essentiellement des alluvions et des matériaux provenant des roches massives :

- qu'ils soient non liés, comme les matériaux naturels, les graves non traitées (GNT),
- ou qu'ils soient traités avec un liant comme le bitume pour faire des graves-bitume et des bétons bitumineux ou avec un liant hydraulique pour faire des graves-liants hydrauliques et du béton.



Vue générale d'un chantier routier en construction.

En outre, extraire et fabriquer les granulats, les transporter jusqu'au lieu de fabrication, produire les matériaux élaborés ou les mélanges, puis les transporter de la centrale au chantier et enfin les mettre en œuvre, sont des opérations qui ne sont pas sans impact sur l'environnement.

Citons entre autres :

- la réduction des réserves en granulats,
- les nuisances générées par les transports et les risques induits par le trafic des véhicules,
- sans oublier le délicat problème de la gestion des rebuts issus de la déconstruction d'ouvrages ainsi que de l'exploitation des gisements.

1.2 - Besoin d'entretenir les routes

Sous l'action du trafic toujours plus contraignant et des agressions climatiques, les chaussées vieillissent, se dégradent progressivement pour aboutir à des structures inadéquates, où les matériaux n'offrent plus les caractéristiques physiques et mécaniques en adéquation avec les fonctions exigées.

Ces chaussées montrent, avec le temps, des signes révélateurs de faiblesses structurelles telles que fissures, faïençage, déformation, souvent aggravées par les effets du gel/dégel. Ces désordres conduisent à une forte diminution du niveau de service requis pour l'utilisateur, particulièrement sur le plan du confort et de la sécurité. De plus, ces désordres peuvent, en l'absence d'entretien, entraîner la ruine de la structure et la perte totale du patrimoine.



Vues générales de routes dégradées.

La réfection complète de la chaussée s'impose naturellement. Elle est certes une solution technique fiable et éprouvée, mais elle présente l'inconvénient d'être onéreuse, fortement consommatrice de matériaux nobles et génératrice de déchets à mettre en décharge.

Aussi, l'ingénierie routière avait-elle souvent opté pour une solution technique jugée à cette époque optimisée et économique, qui considérait la chaussée au terme de sa période de service comme la fondation d'une nouvelle structure, nécessitant certes l'apport de matériaux nouveaux et « nobles » mais uniquement en couche de base et en couche de roulement. En outre, elle évitait la mise à la décharge des matériaux de l'ancienne chaussée.

C'est la technique de renforcement des chaussées. Précisément, c'était l'option prise par la Direction des Routes de France à partir de la fin des années soixante dans le cadre de la politique des renforcements coordonnés des Routes Nationales.

1.3 - Construire et entretenir : Oui, mais pas à n'importe quel prix

Plusieurs facteurs sont venus remettre en cause les pratiques en matière de construction, d'entretien et de réhabilitation des chaussées.

Les contraintes environnementales pour une économie des ressources non renouvelables et l'obligation de recycler (Loi du 13 juillet 1992), l'interdiction depuis 2002 de mettre en décharge des déchets autres que des déchets ultimes, la raréfaction des ressources naturelles dans certaines régions ou leur éloignement des chantiers ou la difficulté croissante de leur extraction (respect de l'environnement), le gisement considérable en ressources représenté par le réseau existant d'infrastructures routières, l'augmentation des coûts de transport sont autant de facteurs et d'éléments moteurs qui ont incité les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, fournisseurs de liants, fabricants de matériels et entreprises routières à mettre au point et développer des produits et des techniques de valorisation en place des matériaux existants dans le corps de l'ancienne chaussée.

Dans cette optique, la technique de retraitement en place à froid des chaussées aux liants hydrauliques prend toute sa signification car elle permet de valoriser les matériaux existants *in situ*, plutôt que de les évacuer en décharge pour les remplacer par des matériaux neufs.

1.4 - Le retraitement des chaussées en place à froid aux liants hydrauliques

Le retraitement des chaussées en place est une technique destinée à recréer, à partir d'une chaussée dégradée, une structure homogène aux performances adaptées au trafic à supporter. Elle consiste à incorporer au matériau, obtenu par fractionnement de l'ancienne chaussée, du ciment ou du liant hydraulique routier, et à les mélanger intimement, *in situ*, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène et performant. On réalise ainsi, après réglage et compactage, une nouvelle assise de chaussée sur laquelle on applique, soit une couche de surface, soit d'autres couches de chaussée si la partie retraitée ne peut, à elle seule, supporter les sollicitations du trafic.

Le retraitement des chaussées en place aux liants hydrauliques est une technique relativement ancienne. Le "Retread Process" a vu le jour aux États-Unis dans les années cinquante. Il a été utilisé en France, à une échelle limitée, après l'hiver rigoureux 1962-1963, pour la remise en état des chaussées dégradées par le gel. Les machines de retraitement dont on disposait, à l'époque, étaient peu performantes et les études préalables n'étaient pas suffisamment élaborées pour permettre à ce procédé de se développer. Depuis quelques années, le retraitement des chaussées en place à froid aux liants hydrauliques, connaît un nouvel essor : on estime à environ 2 millions de m² les chaussées qui sont retraitées annuellement en France.



Vue générale d'un chantier de retraitement des chaussées en place à froid aux liants hydrauliques.

Cet intérêt croissant pour la technique est dû à la conjonction de trois phénomènes :

- Une meilleure connaissance des performances mécaniques des matériaux traités au ciment ou au liant hydraulique routier et du comportement des structures semi-rigides ;
- Une amélioration notable des performances et de la fiabilité des matériels de retraitement ;
- Une technique parfaitement au point et maîtrisée par l'ensemble des acteurs. Elle fait l'objet d'une codification complète et précise dans le **guide technique « Retraitement en place à froid des anciennes chaussées » (SETRA/CFTR – Juillet 2003 [1])** et elle est couverte, au même titre que les matériaux d'assise de chaussées, par la **norme NF P 98 115**.

De plus, un cadre pour la rédaction du Dossier de Consultation des Entreprises « D.C.E. » a été édité par CIMBÉTON. Ce document [2] comprend trois parties :

- 1) Le Cahier des clauses techniques particulières CCTP type,
- 2) Le Bordereau de Prix Unitaires « B.P.U. »,
- 3) Le Détail Estimatif « D.E. ».



Guide CFTR et CCTP-Type CIMBÉTON

Présentation du gisement

**2.1 - Le réseau routier français :
un gisement important de matériaux**

**2.2 - Le réseau routier français :
un patrimoine considérable**

**2.3 - Le réseau routier français :
un gisement facilement valorisable**

2.3.1 - Le réseau des autoroutes concédées
et non concédées

2.3.2 - Le réseau des Routes Nationales

2.3.3 - Le réseau des Routes Départementales

2.3.4 - Le réseau des Routes communales
et rurales

**2.4 - Le réseau routier français :
évaluation du gisement potentiel**

2.1 - Le réseau routier français : un gisement important de matériaux

Le gisement potentiel est l'ensemble des matériaux qui ont été utilisés pour la construction des infrastructures routières françaises. Le tableau 1 donne la constitution du réseau routier (Autoroutes concédées, Routes Nationales, Routes Départementales, Routes communales et routes rurales) ainsi que la répartition du linéaire total entre les différentes catégories de routes.

Les chiffres figurant dans le tableau 1 nous permettent d'estimer la quantité de matériaux « nobles » utilisés et disponibles sur l'ensemble du réseau. Elle s'élève à environ 5 milliards de tonnes, c'est-à-dire l'équivalent de 25 ans de consommation française pour la construction et l'entretien de ses infrastructures de transport.

Tableau 1 - Le réseau routier français				
	Longueur totale (km)*	Catégorie de trafic		
		Fort $T > T_3$	Faible $T_5 \leq T \leq T_3$	Très faible T_6
Réseau national				
- autoroutes (concédées et non concédées)	11 250	11 250	-	-
- routes nationales	9 020	9 020	-	-
Réseau départemental	378 000	180 000	198 000	-
Réseau communal	635 000	50 000	275 000	310 000
Réseau rural	600 000	-	200 000	400 000
	1 633 270	250 270	673 000	710 000
Marché total routes à faible trafic : 1 383 000 km				

*Sources : SETRA, ASFA, USIRF

2.2 - Le réseau routier français : un patrimoine considérable

Le réseau routier français totalise environ 1 633 270 km.

Il représente un patrimoine considérable :

- **Capital investi : 1 225 milliards d'euros.**

Du fait de l'accroissement constant du trafic routier, notamment du trafic lourd, ces routes se dégradent rapidement et doivent être réhabilitées périodiquement :

- **Budget moyen annuel d'entretien : 7,6 milliards d'euros.**

2.3 - Le réseau routier français : un gisement facilement valorisable

Le réseau routier français se compose à 95% de chaussées souples (grave non traitée et grave traitée au bitume) et semi-rigides (grave traitée aux liants hydrauliques), le reste étant constitué de chaussées rigides (béton de ciment) et de pavages/dallages de différentes natures (pavés et dalles béton, pavés et dalles en produits naturels).

Excepté les structures rigides et les structures pavées/dallées où la valorisation des matériaux nécessite au préalable un traitement particulier (démolition, concassage et criblage), les matériaux existants sur le réseau routier français, soit 95% du gisement, sont valorisables facilement sur site par un traitement adéquat avec un liant hydraulique.

En ce qui concerne la nature du gisement, les matériaux rencontrés dans les structures de chaussées varient en fonction du réseau observé. Nous allons lister ci-après les différents types de structures les plus couramment utilisées sur chaque catégorie de réseau.



Une ancienne chaussée, gisement de matériau facilement valorisable.

2.3.1 - Le réseau des autoroutes concédées et non concédées

Le réseau des autoroutes concédées et non concédées totalise 11 250 km et représente :

- **Capital investi : 75 milliards d'euros,**
- **Budget annuel d'entretien : 0,4 milliard d'euros.**



Vue générale d'une section autoroutière.

Ce réseau se caractérise par :

- Chaussée de largeur ≥ 8 m pour 100% du réseau,
- Structure en matériaux bitumineux : environ 70% du linéaire,
- Protection assurée contre le gel : la structure est « Hors-gel »,
- Circulation forte : trafic supérieur à 300 PL/j,
- Etat du réseau : bon. Environ 5% du réseau nécessite un entretien annuel.

Sur ce réseau, on rencontre trois principaux types de structures de chaussées :

2.3.1.1 - Les chaussées bitumineuses

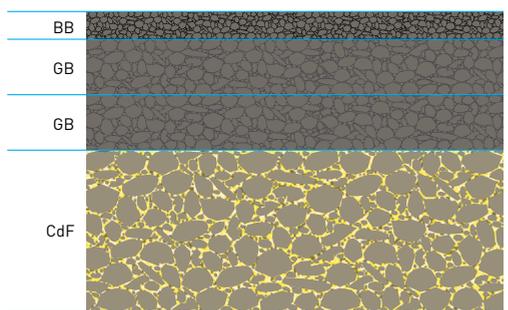


Figure 1 : Coupe en travers-type BB/GB/GB/CdF - Epaisseur totale 60 cm.

Ce sont des chaussées dont l'assise (couche de fondation et couche de base) est constituée de matériaux bitumineux (grave bitume GB, enrobé à module élevé EME) (figure 1). Elles constituent l'essentiel du réseau autoroutier où elles représentent environ 70% du linéaire. Ce sont des structures relativement récentes, constituées de matériaux à faible granulométrie ($D \leq 14$ mm). Elles sont surmontées d'une couche de surface en matériaux bitumineux à faible granulométrie BB ($D \leq 10$ mm).

Ces chaussées sont généralement réalisées sur des plates-formes support de bonne qualité (portance $\geq PF_2$), obtenues soit par traitement de l'arase, soit par la réalisation d'une couche de forme CDF (souvent traitée), soit par les deux.

2.3.1.2 - Les chaussées à structure mixte

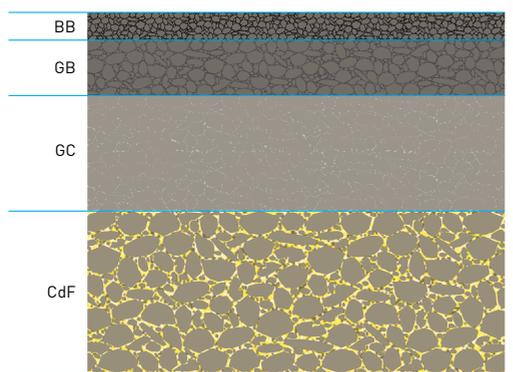


Figure 2 : Coupe en travers-type BB/GB/GC/CdF -
Épaisseur totale 75 cm.

Elles sont constituées d'une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques GC surmontée d'une couche de base en matériaux bitumineux (figure 2). Elles constituent une part notable du réseau autoroutier où elles représentent environ 20% du linéaire. Ce sont des structures plus ou moins récentes, constituées de matériaux à faible granulométrie ($D \leq 20$ mm). Elles sont surmontées d'une couche de surface en matériaux bitumineux à faible granulométrie ($D \leq 10$ mm).

Ces chaussées sont généralement réalisées sur des plates-formes support de bonne qualité (portance $\geq PF_2$), obtenues soit par traitement de l'arase, soit par la réalisation d'une couche de forme (souvent traitée), soit par les deux.

2.3.1.3 - Les chaussées en béton

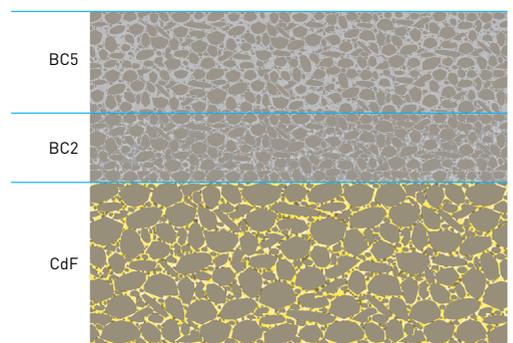


Figure 3 : Coupe en travers-type BC5/BC2/CdF -
Épaisseur totale 75 cm.

Elles sont constituées d'un revêtement en béton (béton non armé et à joints non goujonnés BC5, béton non armé à joints goujonnés BC5g, béton armé continu BAC) posé sur une fondation en matériaux traités (grave - ciment GC, béton maigre BC2, parfois grave - bitume) (figure 3). Elles représentent environ 10% du linéaire du réseau autoroutier. Ce sont des structures plus ou moins anciennes, constituées de matériaux parfois à

forte granulométrie ($D \leq 50$ mm). Elles ont été, en grande partie, recouvertes d'une couche de surface en matériaux bitumineux à faible granulométrie ($D \leq 10$ mm).

Ces chaussées sont généralement réalisées sur des plates-formes support de moyenne qualité (portance $\geq PF_1$), obtenues soit par traitement de l'arase, soit par la réalisation d'une couche de forme (souvent non traitée).

2.3.2 - Le réseau des Routes Nationales

Le réseau des Routes Nationales totalise 9 020 km et représente :

- **Capital investi : 50 milliards d'euros,**
- **Budget annuel d'entretien : 0,2 milliard d'euros.**



Vue générale d'une section de Route Nationale.

Ce réseau se caractérise par :

- Chaussée de largeur ≥ 8 m,
- Protection assurée contre le gel : la structure est « Hors-gel »,
- Circulation forte : trafic supérieur à 150 PL/ j,
- Etat du réseau : moyen. Environ 5% du réseau nécessite un entretien annuel.

Sur ce réseau, on rencontre quatre principaux types de structures de chaussées :

2.3.2.1- Les chaussées bitumineuses

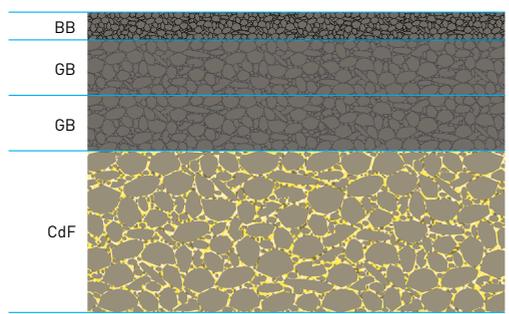


Figure 4 : Coupe en travers-type BB/GB/GB/CdF –
Épaisseur totale 60 cm

Ce sont des chaussées dont l'assise (couche de fondation et couche de base) est constituée de matériaux bitumineux (grave bitume, enrobé à module élevé) (figure 4). Elles constituent l'essentiel du réseau des routes nationales où elles représentent environ 50% du linéaire. Ce sont des structures relativement récentes, constituées de matériaux à faible granulométrie ($D \leq 14$ mm).

Elles sont surmontées d'une couche de surface en matériaux bitumineux à faible granulométrie ($D \leq 10$ mm).

Ces chaussées sont généralement réalisées sur des plates-formes support de bonne qualité (portance $\geq PF_2$), obtenues soit par traitement de l'arase, soit par la réalisation d'une couche de forme (souvent traitée), soit par les deux.

2.3.2.2 - Les chaussées à structure mixte

Elles sont constituées d'une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques surmontée d'une couche de base en matériaux bitumineux (figure 5). Elles constituent une part notable du réseau des routes nationales où elles représentent environ 20% du linéaire. Ce sont des structures plus ou moins

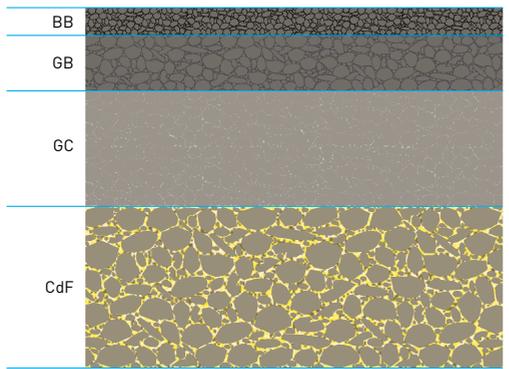


Figure 5 : Coupe en travers-type BB/GB/GC/CdF - Epaisseur totale 75 cm.

récentes, constituées de matériaux à faible granulométrie ($D \leq 20$ mm). Elles sont surmontées d'une couche de surface en matériaux bitumineux à faible granulométrie ($D \leq 10$ mm).

Ces chaussées sont généralement réalisées sur des plates-formes support de bonne qualité (portance $\geq PF_2$), obtenues soit par traitement de l'arase, soit par la réalisation d'une couche de forme (souvent traitée), soit par les deux.

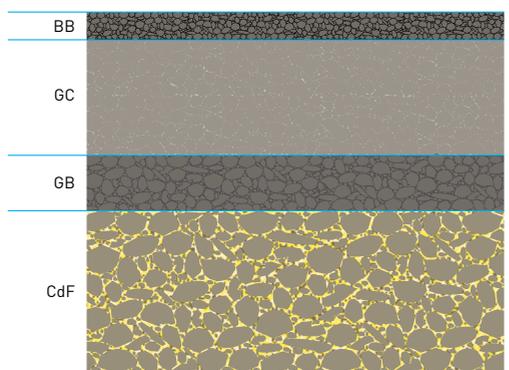


Figure 6 : Coupe en travers-type BB/GC/GB/CdF - Epaisseur totale 90 cm

2.3.2.3 - Les chaussées à structure mixte inversée

Elles sont constituées d'une couche de fondation en matériaux bitumineux surmontée d'une couche de base en matériaux traités aux liants hydrauliques (figure 6). Elles sont le résultat de la politique de renforcement coordonné menée dans les années 60-70 sur d'anciennes structures bitumineuses. Elles constituent une part notable

du réseau des routes nationales où elles représentent environ 18% du linéaire. Ce sont des structures plus ou moins récentes, constituées de matériaux à faible granulométrie ($D \leq 20$ mm). Elles sont surmontées d'une épaisse couche de surface en matériaux bitumineux à faible granulométrie ($D \leq 10$ mm).

Ces chaussées sont généralement réalisées sur des plates-formes support de moyenne qualité (portance $\geq PF_1$), obtenues par la réalisation d'une couche de forme souvent non traitée.

2.3.2.4 - Les chaussées en béton

Elles sont constituées d'un revêtement en béton (béton non armé et à joints non goujonnés, béton non armé à joints goujonnés, béton armé continu) posé sur une fondation en matériaux traités (grave - ciment, béton maigre, parfois grave - bitume) (figure 7). Elles représentent environ 2% du linéaire du réseau des routes nationales. Ce sont des structures plus ou moins anciennes, constituées de matériaux parfois à forte granulométrie ($D \leq 50$ mm). Elles ont été, en grande partie, recouvertes d'une couche de surface en matériaux bitumineux à faible granulométrie ($D \leq 10$ mm).

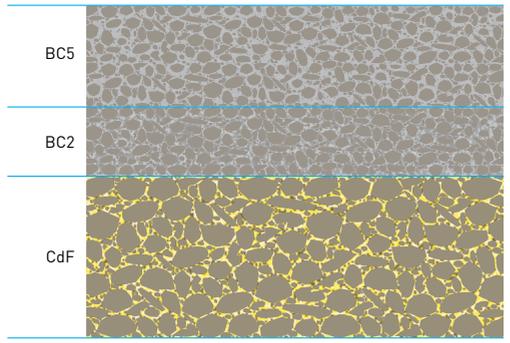


Figure 7 : Coupe en travers-type BC5/BC2/CdF - Epaisseur totale 75 cm.

Ces chaussées sont généralement réalisées sur des plates-formes support de moyenne qualité (portance $\geq PF_1$), obtenues soit par traitement de l'arase, soit par la réalisation d'une couche de forme (souvent non traitée).

2.3.2.5 - Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

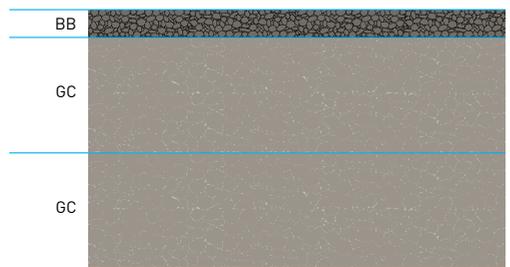


Figure 8 : Coupe en travers-type BB/GC/GC épaisseur totale 60 cm.

Ce sont des chaussées dont l'assise (couche de fondation et couche de base) est constituée de matériaux traités aux liants hydrauliques (grave - ciment, grave - liant hydraulique routier, grave - laitier, grave - cendres volantes) (figure 8). Elles constituent une part notable du réseau des routes nationales où elles représentent environ 10% du linéaire. Ce sont des

structures relativement récentes, constituées de matériaux à faible granulométrie ($D \leq 20$ mm). Elles sont surmontées d'une couche de surface en matériaux bitumineux à faible granulométrie ($D \leq 10$ mm).

Ces chaussées sont généralement réalisées sur des plate-formes support de qualité moyenne (portance $\geq PF_1$).

2.3.3 - Le réseau des Routes Départementales

Le réseau des Routes Départementales totalise 378 000 km, dont :

- 358.000 km de Routes Départementales,
- 20.000 km de Routes Nationales rétrocédées aux Départements dans le cadre de la décentralisation.

Il représente :

- **Capital investi : 500 milliards d'euros,**
- **Budget annuel d'entretien : 3 milliards d'euros, soit 10% du budget total des Collectivités locales.**



Vue générale d'une section de Route Départementale.

Ce réseau se caractérise par :

- Chaussée de largeur réduite : entre 4 et 6 mètres pour 75% du réseau,
- Structure souple : environ 60% du linéaire,
- Matériau d'assise : non traité et souvent hétérogène (briques, gravats, pierres, etc.), posé sur un fond de forme souvent argileux ou limoneux,
- Protection contre le gel : la structure n'est pas « Hors-gel » pour une bonne partie du réseau,
- Circulation moyenne : trafic compris entre 25 et 150 PL/ j pour 75% du réseau,
- Etat du réseau : moyen. Environ 5% du réseau nécessite un entretien annuel.

Sur ce réseau, on rencontre cinq principaux types de structures de chaussées :

2.3.3.1 - Les chaussées souples

Elles constituent l'essentiel du réseau des routes départementales où elles représentent environ 60% du linéaire. Elles sont constituées d'une couche de fondation non traitée et épaisse (épaisseur variant entre 20 et 50 cm) surmontée d'une (ou de plusieurs) couche(s) en matériaux bitumineux d'épaisseur inférieure à 15 cm (figure 9). En ce qui concerne les matériaux utilisés en couche de fondation. Il s'agit :

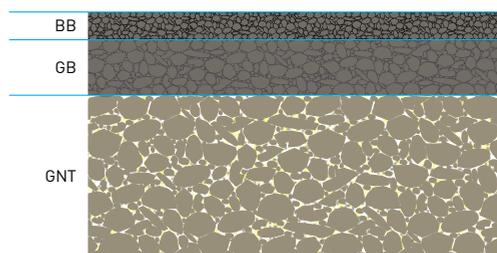


Figure 9 : Coupe en travers-type BB/GB/GNT ou hérisson ou macadam épaisseur totale 50 cm.

- Pour les chaussées les plus récentes, de grave non traitée élaborée GNT ($D \leq 31,5$ mm),
- Pour les chaussées les plus anciennes, de hérisson (lit de grosses pierres disposées à la main et calées par des éclats de pierre) ou de macadam (lit de pierres cassées). Ces chaussées sont constituées souvent de matériaux à forte granulométrie ($D > 80$ mm), hétérogènes et pollués.

Ces chaussées sont généralement réalisées sur un sol support de qualité médiocre.

2.3.3.2 - Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Ce sont des chaussées dont l'assise (couche de fondation et couche de base) est constituée de matériaux traités aux liants hydrauliques (grave - ciment, grave - liant hydraulique routier, grave - laitier, grave - cendres volantes). Elles constituent

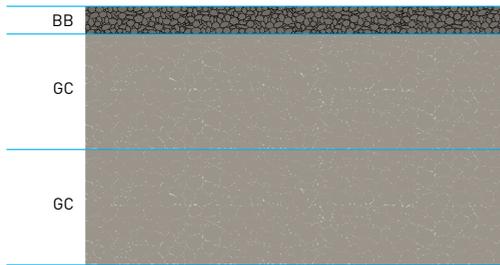


Figure 10 : Coupe en travers-type BB/GC/GC - Épaisseur totale 60 cm.

une part notable du réseau des routes départementales où elles représentent environ 15% du linéaire. Ce sont des structures relativement récentes, constituées de matériaux à faible granulométrie ($D \leq 20$ mm). Elles sont surmontées d'une couche de surface en matériaux bitumineux à faible granulométrie ($D \leq 10$ mm) (figure 10).

Ces chaussées sont généralement réalisées sur un sol support de qualité médiocre.

2.3.3.3 - Les chaussées à structure mixte

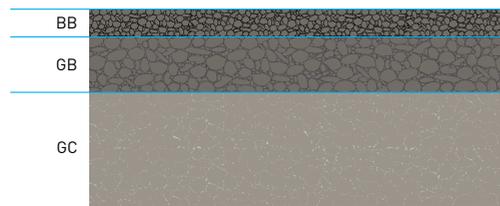


Figure 11 : Coupe en travers-type BB/GB/GC - Épaisseur totale 60 cm.

Elles sont constituées d'une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques surmontée d'une couche de base en matériaux bitumineux (figure 11). Elles constituent une part notable du réseau des routes départementales où elles représentent environ 15% du linéaire.

Ce sont des structures plus ou moins récentes, constituées de matériaux à faible granulométrie ($D \leq 20$ mm). Elles sont surmontées d'une couche de surface en matériaux bitumineux à faible granulométrie ($D \leq 10$ mm).

Ces chaussées sont généralement réalisées sur un sol support de qualité médiocre.

2.3.3.4 - Les chaussées à structure mixte inversée

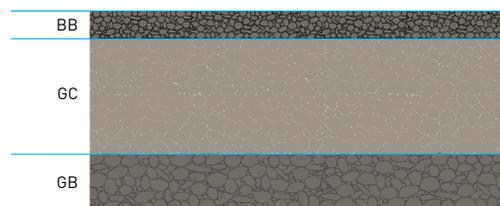


Figure 12 : Coupe en travers-type BB/GC/GB - Épaisseur totale 60 cm.

Elles sont constituées d'une couche de fondation en matériaux bitumineux surmontée d'une couche de base en matériaux traités aux liants hydrauliques (figure 12). Elles sont le résultat de la politique de renforcement coordonné menée sur d'anciennes structures bitumineuses.

Elles constituent une faible part du réseau des routes départementales où elles représentent environ 8% du linéaire.

Ce sont des structures plus ou moins récentes, constituées de matériaux à faible granulométrie ($D \leq 20$ mm). Elles sont surmontées d'une épaisse couche de surface en matériaux bitumineux à faible granulométrie ($D \leq 10$ mm).

Ces chaussées sont généralement réalisées sur des plates-formes support de moyenne qualité, obtenues par la réalisation d'une couche de forme souvent non traitée.

2.3.3.5 - Les chaussées en béton



Figure 13 : Coupe en travers-type d'une structure Béton.

Elles sont constituées d'un revêtement en béton (béton non armé et à joints non goujonnés, béton non armé à joints goujonnés, béton armé continu) posé sur une fondation en matériaux traités (grave - ciment, béton maigre, parfois grave - bitume) (figure 13). Elles représentent environ 2% du

linéaire du réseau des routes départementales. Ce sont des structures plus ou moins anciennes, constituées de matériaux parfois à forte granulométrie ($D \leq 50$ mm). Elles ont été, en grande partie, recouvertes d'une couche de surface en matériaux bitumineux à faible granulométrie ($D \leq 10$ mm).

Ces chaussées sont généralement réalisées sur un sol support de qualité médiocre.

2.3.4 - Le réseau des Routes communales et rurales

Le réseau des routes communales et rurales totalise 1 235 000 km.

Il représente :

- **Capital investi : 600 milliards d'euros,**
- **Budget annuel d'entretien : 4 milliards d'euros, soit 20% du budget total des Collectivités locales.**



Vue générale d'une section de route communale.

Ce réseau se caractérise par :

- Chaussée de largeur réduite : entre 3 et 5 mètres pour 75% du réseau,
- Structure souple : environ 85% du linéaire,
- Matériau d'assise : non traité et souvent hétérogène (briques, gravats, pierres, etc.), posé sur un fond de forme souvent argileux ou limoneux,
- Protection contre le gel : la structure n'est pas « Hors-gel »,
- Circulation faible : trafic inférieur à l'équivalent de 25 PL/ j pour 75% du réseau,

- Etat du réseau : moyen. Environ 5% du réseau nécessite un entretien annuel.

Sur ce réseau, on rencontre cinq principaux types de structures de chaussées :

2.3.4.1 - Les chaussées souples

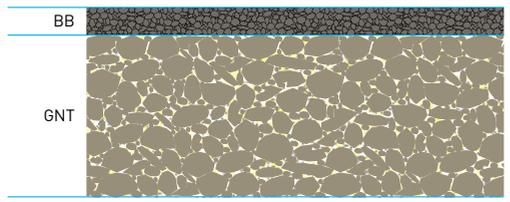


Figure 14 : Coupe en travers-type BB/GNT

Elles constituent l'essentiel du réseau des routes communales où elles représentent environ 85% du linéaire. Elles sont constituées d'une assise non traitée (épaisseur variant entre 20 et 50 cm) surmontée parfois d'une couche en matériaux bitumineux d'épaisseur inférieure à 15 cm (figure 14). En ce qui concerne les matériaux non traités, il s'agit :

- pour les chaussées les plus récentes, de grave non traitée élaborée ($D \leq 31,5$ mm),
- pour les chaussées les plus anciennes, de hérisson (lit de grosses pierres disposées à la main et calées par des éclats de pierre) ou de macadam (lit de pierres cassées). Ces chaussées sont constituées souvent de matériaux à forte granulométrie ($D > 80$ mm), hétérogènes et pollués.

Ces chaussées sont généralement réalisées sur un sol support de qualité médiocre.

2.3.4.2 - Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

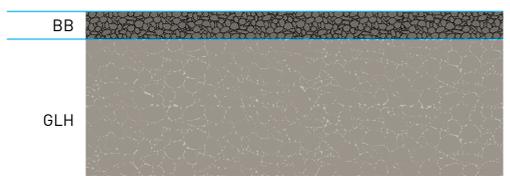


Figure 15 : Coupe en travers-type BB/GLH.

Ce sont des chaussées dont l'assise (couche de fondation et couche de base) est constituée de matériaux traités aux liants hydrauliques GLH (grave - ciment, grave - liant hydraulique routier, grave - laitier, grave - cendres volantes) (figure 15). Elles constituent une faible part du réseau des routes communales où elles représentent environ 5% du

linéaire. Ce sont des structures relativement récentes, constituées de matériaux à faible granulométrie ($D \leq 20$ mm). Elles sont surmontées d'une couche de surface en matériaux bitumineux à faible granulométrie ($D \leq 10$ mm).

Ces chaussées sont généralement réalisées sur un sol support de qualité médiocre.

2.3.4.3 - Les chaussées à structure mixte

Elles sont constituées d'une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques surmontée d'une couche de base en matériaux bitumineux (figure 16). Elles constituent une faible part du réseau des routes communales où elles représentent environ 5% du linéaire. Ce sont des structures plus ou moins récentes, constituées de matériaux à faible granulométrie ($D \leq 20$ mm). Elles sont surmontées d'une couche de surface en produits bitumineux à faible granulométrie ($D \leq 10$ mm).

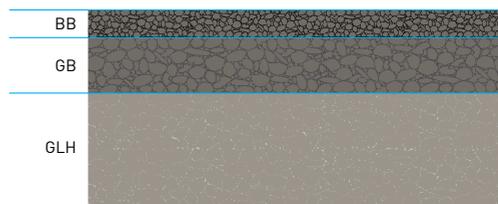


Figure 16 : Coupe en travers-type BB/GB/GLH.

Ces chaussées sont généralement réalisées sur un sol support de qualité médiocre.

2.3.4.4 - Les chaussées pavées ou dallées

Elles sont constituées d'un revêtement en pavés (béton ou pierres naturelles) ou en dalles (béton ou pierres naturelles) posé sur une assise (figure 17) :

- en matériaux traités (grave - bitume, grave - ciment ou béton) pour les routes circulées,
- en matériaux non traités (grave non traitée) pour les routes à circulation véhicule faible ou nulle.

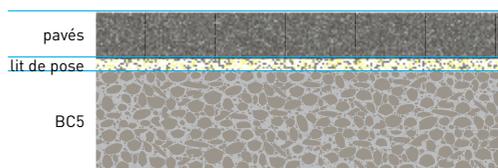


Figure 17 : Coupe en travers-type Elément Modulaire/Lit de pose/Assises.

Elles représentent environ 3% du linéaire du réseau des routes communales.

Ces chaussées sont généralement réalisées sur un sol support de qualité médiocre.

2.3.4.5 - Les chaussées en béton

Elles sont constituées d'un revêtement en béton (béton non armé et à joints non goujonnés) posé soit directement sur le sol support, soit sur une fondation en matériaux non traités (figure 18). Elles représentent environ 2% du linéaire du réseau des routes communales. Ce sont des structures plus ou moins récentes, constituées de matériaux à faible granulométrie ($D \leq 20$ mm).

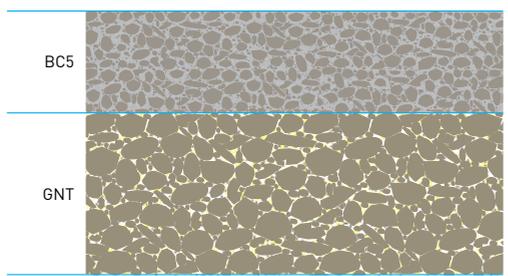


Figure 18 : Coupe en travers-type en béton BC5/GNT/Support

Ces chaussées sont généralement réalisées sur un sol support de qualité médiocre.

2.4 - Le réseau routier français : évaluation du gisement potentiel

Le tableau 2 donne une évaluation de la quantité de matériaux disponibles dans le réseau routier français et facilement valorisables.

En regardant de plus près les structures de chaussées existantes (nature des matériaux utilisés et épaisseurs des couches), nous pouvons les classer en trois grandes familles :

- Les structures de chaussées comportant des matériaux bitumineux en forte épaisseur ($\geq 40\%$ de l'épaisseur de la structure à retraiter),
- Les structures de chaussées en béton,
- Les structures de chaussées comportant des matériaux bitumineux en épaisseur limitée ($< 40\%$ de l'épaisseur de la structure à retraiter), constituées de matériaux non traités ou traités au bitume ou aux liants hydrauliques et recouvertes par une couche bitumineuse de faible épaisseur. Ces structures sont généralement construites sur une plate-forme support de qualité médiocre qui se dégradent au fil du temps : déformations permanentes, nids-de-poule, fissures, faïençage, affaissements et flaches, orniérages à grand rayon... Les causes ont des origines souvent multiples et croisées comme :
 - la fatigue des matériaux sous l'effet du trafic, des poids lourds en particulier,
 - l'altération des matériaux due à un drainage défectueux et/ou sous l'effet des variations climatiques, des alternances de périodes de chaleur, de pluie et des cycles gel/dégel notamment,
 - la remontée dans la structure des matériaux du support sous-jacent (souvent argileux ou limoneux) entraînant une diminution des caractéristiques géotechniques et mécaniques de la chaussée.

En l'absence d'entretien, ces désordres peuvent entraîner la ruine de la structure, voire la perte totale du patrimoine.

Fort de ce constat, nous pouvons conclure que le recyclage des chaussées du réseau routier français peut être envisagé en privilégiant trois grandes filières :

- Pour les chaussées ayant une forte épaisseur de matériaux bitumineux ($\geq 40\%$ de l'épaisseur de la structure à retraiter), le recyclage à chaud des matériaux bitumineux est adapté et peut être couplé avec un retraitement en place aux liants hydrauliques des matériaux de la couche de fondation. Cette situation est généralement rencontrée sur le réseau à fort trafic (Autoroutes, Routes Nationales).
- Pour les structures en béton, la technique de retraitement en place à froid est envisageable à condition d'effectuer au préalable les travaux de démolition et de concassage nécessaires.

- Pour les chaussées comportant des matériaux bitumineux en épaisseur limitée (< 40% de l'épaisseur de la structure à retraiter), constituées de matériaux non traités ou traités au bitume ou aux liants hydrauliques et recouvertes par une couche bitumineuse de faible épaisseur, le retraitement en place à froid de la structure est la voie la plus adaptée sur le plan technique, économique et environnemental. Cette situation est généralement rencontrée sur le réseau à moyen et faible trafic (Routes Départementales, communales et rurales).

Tableau 2 - Le réseau routier, un gisement potentiel de matériaux valorisables

<i>Le réseau</i>	<i>Nature structure</i>	<i>Gisement potentiel (10⁶ m³)</i>		
		<i>Valorisable en l'état (10⁶ m³)</i>	<i>Valorisable in situ après concassage (10⁶ m³)</i>	<i>Total (10⁶ m³)</i>
Autoroutes concédées et non concédées	Chaussée bitumineuse	75	0	75
	Chaussée mixte	25	0	25
	Chaussée béton	0	10	10
Routes Nationales	Chaussée bitumineuse	35	0	35
	Chaussée mixte	18	0	18
	Chaussée mixte inversée	20	0	20
	Chaussée béton	0	2	2
	Assises traitées aux liants hydrauliques	10	0	10
Routes Départementales	Chaussée souple	300	300	600
	Chaussée semi-rigide	180	0	180
	Chaussée mixte	180	0	180
	Chaussée mixte inversée	100	0	100
	Chaussée béton	0	20	20
Routes communales et rurales	Chaussée souple	1 000	850	1 850
	Chaussée semi-rigide	100	0	100
	Chaussée mixte	100	0	100
	Chaussée pavée ou dallée	0	65	65
	Chaussée béton	0	45	45
TOTAL (10⁶ m³)		2 143	1 292	3 435
TOTAL (10⁶ t)		5 120	3 100	8 220

Les liants

3.1 – Les ciments

3.2 – Les Liants Hydrauliques Routiers (LHR)

3.2.1 – Objectifs

3.2.2 - Types de LHR

3.2.3 - Codification et spécifications
performantielles des LHR

3.2.4 - Identification des LHR

3.3 – Les chaux



Vue générale d'une cimenterie.

Différents types de liants hydrauliques existent et chacun a un rôle spécifique dans le processus de retraitement des matériaux routiers.

Le retraitement des chaussées peut également se faire à l'aide d'un liant composé d'une émulsion de bitume (ou mousse de bitume) et de ciment, ou de liant hydraulique routier (LHR), mélangé dans des proportions bien

définies pour assurer, à la fois, l'obtention de performances mécaniques élevées et d'un module de déformation relativement faible, minimisant ainsi l'apparition de fissures de retrait dans le matériau retraité. Cette technique, de par ses particularités techniques et technologiques (matériel développé par des entreprises routières), ne fera pas l'objet de développement dans ce guide.

3.1 - Les ciments

L'importance de la quantité de liant nécessaire à un chantier de retraitement, les sujétions liées au stockage et à la manutention du liant font que, en pratique, seuls sont utilisés les ciments « courants », c'est-à-dire ceux couverts par la norme européenne NF EN 197-1.

Les actions d'un ciment peuvent se résumer de la manière suivante :

• **Immédiatement**

L'abaissement de teneur en eau résulte uniquement de l'apport de matière sèche. Il est donc très limité. Le retraitement au ciment seul ne convient pas pour des matériaux fins et très humides. Une solution est de les prétraiter à la chaux.

• **À moyen et long terme**

La première phase est celle du démarrage de la prise. Elle correspond au délai de maniabilité du mélange. Celui-ci dépend de la nature des constituants principaux du ciment et de leur finesse de mouture, ainsi que de la nature des constituants secondaires et des additifs (retardateurs ou accélérateurs).

La deuxième phase concerne la prise hydraulique, dont la durée dépend principalement de la qualité et de la finesse du ciment.

La troisième phase est celle du durcissement progressif qui s'étale sur une période allant d'un à plusieurs mois.

La prise hydraulique ralentit quand la température du matériau tombe en dessous

de 5 °C environ. La période de retraitement et le type de ciment doivent donc être choisis de manière à garantir que le matériau retraité aura atteint un niveau de résistance mécanique et de tenue au gel suffisants avant l'arrivée des premiers froids néfastes.

3.2 - Les liants hydrauliques routiers (LHR)

Dès la fin des années quatre-vingt, les sociétés cimentières françaises ont commencé à concevoir et à mettre au point des liants hydrauliques distincts des ciments classiques normalisés et dédiés à la construction routière. Ces produits appelés liants hydrauliques routiers (LHR) se sont, depuis, beaucoup développés.

3.2.1 - Objectif

La démarche répond à un objectif technique.

Le but est de mettre à disposition des acteurs de la construction routière des liants spécialement formulés pour donner les meilleurs résultats pour les opérations de terrassements ou de construction d'assises, tant en termes de facilité d'usage que de niveau de performances du mélange final.

3.2.2 - Types de LHR

Certains LHR ont été mis au point pour le traitement des graves ou des sables utilisés en assises de chaussée. D'autres l'ont été pour le traitement des sols.

Des informations précises sur les divers liants hydrauliques routiers disponibles peuvent être obtenues auprès des sociétés cimentières qui les produisent.

3.2.3 - Codification et spécifications performantielles des LHR

Ils ont donné lieu à une norme française : NF P 15-108 « Liants hydrauliques – Liants hydrauliques routiers – Composition, spécifications et critères de conformité ».

Ils seront couverts, à court terme (probablement à partir de 2014), par la norme NF EN 13282 (parties 1 et 2). La première partie de cette norme correspond aux LHR dits « à durcissement rapide » dont les résistances à la compression sont mesurées à 28 jours. Quatre classes sont définies sur la base des niveaux de résistance mécanique à atteindre (tableau 3).

Le temps de début de prise doit être d'au moins 90 minutes pour les LHR des classes E2, E3 et E4, pour les LHR de classe E4 RS, le temps de début de prise ne doit pas excéder 90 minutes.

Tableau 3 - Résistances mécaniques requises pour les LHR « à durcissement rapide »

Classe	Résistance à la compression (MPa)		
	à 7 jours	à 28 jours	
E2	≥ 5,0	≥ 12,5	< 32,5
E3	≥ 10,0	≥ 22,5	< 42,5
E4	≥ 16,0	≥ 32,5	< 52,5
E4 RS	≥ 16,0	≥ 32,5	-

La deuxième partie de la norme couvre les LHR dits « à durcissement normal ». Le tableau 4 indique les exigences mécaniques des quatre classes.

Pour les 4 classes, le temps de début de prise doit être d'au moins 150 minutes.

Tableau 4 - Résistances mécaniques requises pour les LHR « à durcissement normal »

Classe	Résistance à la compression à 56 jours (MPa)	
N1	≥ 5,0	≤ 22,5
N2	≥ 12,5	≤ 32,5
N3	≥ 22,5	≤ 42,5
N4	≥ 32,5	≤ 52,5

Ces spécifications – on notera en particulier que les résistances à la compression sont mesurées à 56 jours, et non à 28 jours - correspondent bien à des liants moins « nerveux » que les LHR dits « à durcissement rapide ».

Des informations détaillées figurent dans les fiches techniques des différents LHR disponibles sur le marché ou peuvent être obtenues auprès des sociétés cimentières qui les fabriquent.

3.2.4 - Identification des LHR

Conformément à la norme NF EN 13282 (parties 1 et 2), les liants hydrauliques routiers sont identifiés ainsi :

- HRB (pour Hydraulic Road Binder) ;
- leur classe (Ei ou Nj) ;
- leur composition nominale en constituants principaux (des tolérances de pourcentages sont définies) ;
- la présence éventuelle de sulfate de calcium ;
- la présence éventuelle d'additifs (maximum 1 %).

Les constituants sont codés comme suit :

- clinker Portland : K
- laitier granulé de haut-fourneau : S
- laitier d'aciérie à l'oxygène : Sb
- pouzzolane naturelle : P
- pouzzolane naturelle calcinée : Q
- cendres volantes siliceuses : V
- cendres volantes siliceuses de lit fluidisé : Va
- cendres volantes calciques : W
- cendres volantes calciques non éteintes : Wa
- schiste calciné : T
- calcaire : avec teneur en carbone organique < 0,5 % : L
avec teneur en carbone organique < 0,2 % : LL
- chaux aérienne calcique vive : CL-Q
- chaux aérienne calcique éteinte : CL-S
- chaux hydraulique naturelle : NHL
- sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) : Cs

Voici deux exemples d'identification de liant hydraulique routier :

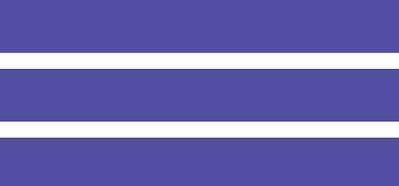
HRB N 2 S 55 V 25 CL 15 Cs

HRB E 4 K 80 V 10 CL 10 Cs

3.3 - Les chaux

L'utilisation de la chaux peut s'avérer nécessaire dans le cas particulier d'une remontée d'argile dans le corps de chaussée. La chaux peut être d'origines diverses :

- La chaux calcique aérienne vive, couverte par la norme NF EN 459-1 : « Chaux de construction - Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité ».
- La chaux calcique aérienne éteinte (peu utilisée).
- Les chaux hydrauliques (réservées aux travaux bâtiment).



Chapitre

4

Technique de retraitement

4.1 - Quatre opérations essentielles

4.1.1 - La fragmentation

4.1.2 - L'épandage

4.1.3 - Le traitement

4.1.4 - Le compactage et la préfissuration

4.1.5 - La finition

4.2 - La classe de retraitement

Le retraitement des chaussées en place à froid aux liants hydrauliques est une technique destinée à recréer, à partir d'une chaussée dégradée, une structure homogène et adaptée au trafic à supporter. Elle consiste à incorporer au sein du matériau, obtenu par fractionnement de l'ancienne chaussée, un ciment ou un liant hydraulique routier et éventuellement un correcteur granulométrique et de l'eau, et de les mélanger intimement, *in situ*, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène.

On réalise ainsi, après réglage et compactage, une nouvelle assise de chaussée sur laquelle on applique, soit une couche de surface, soit d'autres couches de chaussée si la partie retraitée ne peut, à elle seule, supporter les sollicitations du trafic.

4.1 - Quatre opérations essentielles

Elles sont réalisées successivement par une ou plusieurs machines.

4.1.1 - La fragmentation

L'objectif de cette opération est de transformer le corps compact de la chaussée en un matériau granulaire O/D, avec $D \leq 63$ mm.

Pour y parvenir, on choisit un matériel spécifique tenant compte de la nature du matériau utilisé dans la confection de l'ancienne chaussée :

- Pour une assise de chaussée en grave non traitée élaborée ou en grave - liant hydraulique ou en grave - bitume, on utilise de préférence une **fraiseuse** qui présente l'avantage de produire un matériau de faible granulométrie comprise entre 0/20 et 0/31,5, directement acceptable par les machines de traitement,



Une fraiseuse en action et aspect du matériau fraisé.

- Pour une assise de chaussée en matériau non lié (macadam ou hérisson), on procède en deux étapes :
- Le **défonçage** de la chaussée à l'aide d'un **ripper** ou d'une **pelle mécanique**, éventuellement d'un **brise-roche** qui produit un mélange constitué de plaques d'enrobés de tailles variables et de matériau pulvérulent 0/D, avec $D \geq 80$ mm,



Un ripper en action.

- Le **concassage** de ce mélange à l'aide d'un **concasseur mobile** qui va réduire les éléments constitutifs du mélange jusqu'à l'obtention d'un matériau 0/D, avec $D \leq 63$ mm, acceptable par les machines de traitement.



Un concasseur mobile en action.

4.1.2 - L'épandage

L'objectif de cette opération est **d'épandre le ciment ou le liant hydraulique routier** à la surface de l'ancienne chaussée scarifiée, d'une façon homogène (**transversalement et longitudinalement**) et en **quantité précise**, de telle manière que la quantité de liant épandue au mètre carré de chaussée corresponde bien (au coefficient de variation près de la méthode d'épandage) à celle définie dans l'étude de formulation. L'épandage est réalisé, de préférence, à l'aide d'un matériel spécifique : **l'épandeur**.



Épandage mécanisé au moyen d'un épandeur.

4.1.3 - Le traitement

L'objectif de cette opération est de **mélanger intimement *in situ* à froid** les matériaux obtenus par fragmentation de l'ancienne chaussée, éventuellement modifiés par l'ajout d'un correcteur granulométrique et humidifiés, avec le liant épandu lors de l'opération précédente afin d'obtenir, après prise et durcissement, un mélange homogène présentant des caractéristiques mécaniques élevées. Dans le cas où le matériau est à forte teneur en argile, le traitement au liant hydraulique est précédé par un traitement à la chaux.

L'opération de traitement est conduite à l'aide d'un **matériel spécifique** :
le malaxeur pulvérisateur.



Un malaxeur pulvérisateur en action.

4.1.4 - Le compactage et la préfissuration

Cette opération consiste à **régler** suivant un profil déterminé et à **compacter** le matériau traité dans l'opération précédente jusqu'à l'obtention du **niveau de qualité de compactage visé**. Pour maîtriser le retrait du matériau retraité et limiter l'ouverture des fissures, il est conseillé de procéder avant le compactage final à la **préfissuration** de l'assise de chaussée.



Compacteur vibrant.



Machine de préfissuration.

4.1.5 - La finition

Sur cette nouvelle assise de chaussée, on applique :

- **soit une couche de surface** si la structure obtenue est capable de supporter le trafic prévu. La réalisation de cette couche de surface est précédée d'une couche de reprofilage lorsque la taille des éléments en surface est supérieure à 50 mm,



Mise en œuvre de la couche de surface.

- **soit d'autres couches de chaussée** si la partie retraitée ne peut, à elle seule, supporter les sollicitations du trafic.

4.2 - La classe de retraitement

Le retraitement en place à froid aux liants hydrauliques est un retraitement de **classe 4** conformément à la classification du guide CFTR « Retraitement en place à froid des anciennes chaussées – SETRA / CFTR, 2003 [1] ».

Le retraitement de classe 4 est réalisé avec un liant hydraulique. Il s'applique aux anciennes chaussées dont l'assise est constituée de matériaux traités ou non. Le retraitement se fait sur une **épaisseur comprise entre 20 et 42 cm**, en incluant tout ou partie de la couche de surface existante.

Études préalables

5.1 - La faisabilité technique du retraitement

- 5.1.1 - La reconnaissance de la chaussée
- 5.1.2 - Le prélèvement d'échantillons représentatifs
- 5.1.3 - La caractérisation des matériaux prélevés

*5.1.3.1 - Identification de la nature
des matériaux*

*5.1.3.2 - Identification de l'état hydrique
des matériaux*

*5.1.3.3 - Identification d'éventuels
produits inhibiteurs de prise*

- 5.1.4 - Etude de laboratoire

*5.1.4.1 - La définition du mode
de retraitement*

*5.1.4.2 - L'évaluation des caractéristiques
mécaniques des matériaux retraités*

5.1.4.3 - Etude de formulation

5.2 - Analyse économique et environnementale

Le retraitement en place au ciment ou au liant hydraulique routier repose sur l'exploitation optimale du «gisement» de matériau représenté par la chaussée à restructurer et sur son retraitement «en place», c'est-à-dire sur le site même. L'objectif des études préalables est d'évaluer les caractéristiques des matériaux à retraiter afin de proposer un type de retraitement et un dimensionnement adapté au cas de chantier.

Si le procédé est simple et attrayant, faut-il encore s'assurer de la faisabilité technique et de l'intérêt économique et environnemental d'une telle démarche.

5.1 - La faisabilité technique du retraitement

Pour être en mesure d'apprécier la faisabilité technique et les conditions d'utilisation du retraitement, il faut avoir parfaitement identifié les matériaux de l'ancienne chaussée (épaisseur du gisement et caractéristiques des matériaux).

Il est vrai qu'une gamme étendue de matériaux d'anciennes chaussées convient au retraitement. Mais des matériaux de granularité discontinue (macadam) constituent une difficulté et leur retraitement au ciment ou au liant hydraulique routier nécessite au préalable l'apport d'un correcteur granulométrique (sable ou grave). D'autre part, des matériaux trop pollués par de l'argile ne peuvent être retraités tels quels au ciment ou au liant hydraulique routier : un pré-retraitement à la chaux s'avère, dans ce cas, indispensable.

En outre, des matériaux de forte dimension (D supérieure à 80 ou 100 mm), tels que blocages ou hérissons, nécessitent l'utilisation d'un matériel de fragmentation.



Le retraitement d'une chaussée en pavés nécessite au préalable une opération de concassage.

Dans le cas d'un risque de pollution par des produits (matières organiques, sulfures, sulfates ou chlorures) dans les couches d'assises, un test d'aptitude au retraitement, conformément à la norme NF P 94 100, permettra de vérifier la pertinence du choix de la technique du retraitement de cette chaussée.

La faisabilité technique du retraitement peut être précisée rapidement en s'appuyant, s'il y a lieu, sur l'expérience locale (connaissance de la structure et des caractéristiques du matériau de la chaussée). Sinon, une démarche d'identification de la chaussée à retraiter s'impose. Elle comporte plusieurs étapes : la reconnaissance de la chaussée, le prélèvement d'échantillons représentatifs, la caractérisation des matériaux prélevés et l'étude de laboratoire.

5.1.1 - La reconnaissance de la chaussée

Il s'agit de rassembler tous les éléments permettant d'identifier l'état structurel de la chaussée ainsi que la nature et les épaisseurs des couches qui la constituent. Les moyens utilisés sont :

- l'historique de la route ;
- le relevé visuel des dégradations ;
- le cas échéant, une campagne d'auscultation de la route (déflexion, uni transversal et longitudinal, carottages...).



Vue d'une chaussée dégradée.

Cette première étape permet de définir des zones homogènes dans le comportement, l'état et le besoin de la chaussée.

5.1.2 - Le prélèvement d'échantillons représentatifs

Cette étape consiste à effectuer des prélèvements de matériaux en des endroits bien précis de la chaussée, identifiés dans la première étape. Elle nécessite la réalisation de sondages ou de véritables tranchées transversales permettant, en outre, de définir la nature des matériaux en place et la géométrie précise de la structure. Le nombre de prélèvements est à moduler en fonction de la nature et de l'importance du projet. Pour une route à faible trafic en rase campagne, deux ou trois prélèvements sont effectués au kilomètre, par demi-chaussée et en alternance (en quinconce). Des prélèvements complémentaires sont effectués si des modifications de la nature de la chaussée sont observées ou suspectées.

Les tranchées transversales doivent couvrir la largeur de la demi-chaussée. Elles permettent d'établir un profil en travers de la route, sur lequel sont consignés tous les points singuliers tels que bordures, caniveaux, canalisations, câbles, émergences, etc.

Au moment du prélèvement, il faut écrêter le matériau prélevé au tamis de 80 mm. La partie constituée du refus à 80 mm est pesée et stockée. La partie constituée du passant à 80 mm (fraction 0/80) est pesée, conditionnée et transportée au laboratoire pour faire l'objet d'une analyse granulométrique. La quantité de matériau (fraction 0/80 prélevée en chaque point) nécessaire pour mener à bien l'ensemble des essais d'identification est de l'ordre de 100 kg.

A ce stade, il est possible de déterminer si le concassage du matériau est une étape nécessaire avant le démarrage des travaux de retraitement. En effet, l'utilisation d'un pulvérisateur ou machine de malaxage est déconseillée lorsque le matériau de l'ancienne chaussée contient plus de 10% d'éléments de dimensions supérieures à 80 mm. Car la présence d'éléments de dimensions supérieures à 80 mm provoque l'usure rapide, et parfois la rupture, des dents du rotor du pulvérisateur. En outre, elle peut affecter la régularité de surface de la chaussée retraitée.

Ainsi, à l'issue de cette deuxième étape, on sera en mesure d'affirmer la nécessité ou non d'effectuer un concassage du matériau existant dans le corps de la chaussée, préalablement à l'intervention du pulvérisateur.

5.1.3 - La caractérisation des matériaux prélevés

La troisième étape consiste à effectuer, sur les échantillons prélevés, des analyses en laboratoire de manière à identifier :

- La nature et l'état hydrique du support de la chaussée ;
- La nature et l'état hydrique des matériaux composant les différentes couches de la chaussée ;
- La présence éventuelle de produits susceptibles de perturber ou d'empêcher la prise du liant hydraulique (test d'aptitude suivant la norme NF P 94-100).



Vue générale d'un laboratoire routier.

5.1.3.1 - Identification de la nature des matériaux

On réalise les essais suivants :

- **L'analyse granulométrique** : elle est réalisée conformément à la norme NF P 94-056.

L'objectif est de déterminer la courbe granulométrique du matériau (fraction 0/80 mm) et de vérifier si elle s'inscrit dans le fuseau de la norme NF EN 13-285. Si tel n'est pas le cas, le matériau de l'ancienne chaussée peut être corrigé par l'apport d'un correcteur granulométrique.

- **L'argilosité** : elle caractérise à la fois la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans le matériau. On peut la mesurer à l'aide de l'un ou l'autre des paramètres suivants :

- **indice de plasticité I_p** , défini par la norme NF P 94-051

- **la Valeur au Bleu de Méthylène (VBS)**, définie par la norme NF P 94-068.

La connaissance de l'argilosité du matériau permet de déterminer la méthode de retraitement à adopter (retraitement au liant hydraulique si : $I_p \leq 12$ ou $VBS \leq 0,8$; retraitement mixte chaux-liant hydraulique si $I_p > 12$ ou $VBS > 0,8$) et d'évaluer, s'il y a lieu, le dosage en chaux nécessaire pour annihiler les argiles contenues dans le matériau.

On parlera plus loin des qualités M1 et M2 des matériaux (cf : chapitre 7).

Un matériau M1 doit satisfaire aux deux conditions suivantes :

- courbe granulométrique s'inscrivant dans le fuseau de la norme NF EN 13-285
- propreté du matériau évaluée à l'essai au bleu $VBS \leq 0,8$

Si une des deux conditions n'est pas satisfaite, le matériau est de qualité M2.

5.1.3.2 - Identification de l'état hydrique des matériaux

On réalise les essais suivants :

- **La teneur en eau naturelle** du matériau W_{nat} , définie par la norme NF P 94-049 (méthode au four à micro-ondes) ou NF P 94 050 (méthode par étuvage) ;

- **L'essai Proctor**, défini par la norme NF EN 13286-2. Il permet de déterminer la teneur en eau à l'optimum Proctor du matériau considéré W_{OPM} ainsi que la masse volumique de référence.

La connaissance du rapport W_{nat} / W_{OPM} , entre la teneur en eau naturelle et la teneur en eau à l'Optimum Proctor, permet de définir l'état hydrique du matériau considéré. Cette caractéristique est déterminante car elle conditionne, à la fois, le choix du type de chaux à utiliser dans le cas d'un retraitement mixte (vive, éteinte ou lait de chaux) et le dosage éventuel en eau qui assure le bon déroulement des réactions de prise et de durcissement du matériau retraité et l'obtention du niveau de compactage requis pour ce type de matériau.

5.1.3.3 - Identification d'éventuels produits perturbateurs de prise

En plus des paramètres de nature et d'état du matériau, l'étude doit indiquer la présence éventuelle d'éléments susceptibles de perturber l'action du ciment ou du liant hydraulique routier. On réalise alors un test d'aptitude au retraitement, conformément à la norme NF P 94 100.

À l'issue de cette troisième étape, on est en mesure :

- **De juger de la faisabilité technique de la solution de retraitement,**
- **D'affirmer la nécessité ou non d'effectuer un concassage du matériau existant dans le corps de la chaussée préalablement à l'intervention du pulvérisateur,**
- **D'affirmer la nécessité ou non d'un correcteur granulaire,**
- **De donner une estimation de la portance du sol support,**
- **De déterminer la nature du (ou des) liant(s) à envisager pour le retraitement,**
- **D'évaluer les travaux préparatoires à réaliser, tel l'assainissement,**
- **D'identifier et de lister les contraintes de chantier (purges, déflachage, réseaux enterrés, bouches à clefs, etc.)**

5.1.4 - Etude de laboratoire

Après avoir bien identifié le matériau prélevé dans la structure de la chaussée à retraiter et vérifié que l'on est en mesure de confirmer la faisabilité technique du retraitement en place, il est nécessaire de procéder à une étude de laboratoire afin de définir le mode de retraitement, d'évaluer le niveau des performances mécaniques des matériaux retraités et d'aboutir à une étude de formulation.



Préparation et malaxage du matériau traité.

5.1.4.1 - La définition du mode de retraitement

Le mode de retraitement doit permettre de préciser les éléments suivants :

- L'épaisseur de l'ancienne chaussée pouvant être retraitée ;
- La nécessité ou non d'une correction granulaire par concassage, par écrêtage, par apport de matériaux, par les trois solutions ;
- Les choix et dosage du correcteur granulaire éventuel ;
- Le choix du mode de retraitement : au ciment ou au liant hydraulique routier ;
- Le dosage des liants : ciment ou liant hydraulique routier : de 4 à 6 % , éventuellement de la chaux : 1 à 2 % ;
- Le dosage en eau ;
- Le choix des matériels de retraitement en place (pour toutes les opérations) et en particulier pour le malaxage en fonction de D_{max} .



Confection d'une éprouvette de matériau traité.

5.1.4.2 - L'évaluation des caractéristiques mécaniques des matériaux retraités

La connaissance des caractéristiques mécaniques du matériau retraité au ciment ou au liant hydraulique routier est indispensable pour déterminer le dimensionnement de la nouvelle structure, c'est-à-dire l'épaisseur de la couche à retraiter, et pour comparer celle-ci à l'épaisseur envisageable de retraitement, précisée dans la phase « définition du mode de retraitement ».

Il est donc nécessaire d'apprécier, au préalable, les caractéristiques mécaniques du matériau traité au ciment ou au liant hydraulique routier. Ceci fait partie du savoir-faire des entreprises.

En effet, les matériaux de l'ancienne chaussée sont fréquemment hétérogènes, et il n'est pas envisageable de faire varier, sur le chantier, la composition des mélanges pour accompagner les variations granulométriques des granulats en place. Il faut donc choisir une composition moyenne et l'étude devra déterminer la variabilité des caractéristiques mécaniques résultant de la variabilité des granulats par rapport à la composition moyenne. Si l'hétérogénéité des matériaux est trop grande, il est illusoire de vouloir déterminer en laboratoire les caractéristiques mécaniques du matériau retraité, compte tenu de la représentativité médiocre des prélèvements.

Ainsi, pour gérer cette situation, on distingue deux cas de figure :

- Si la structure à retraiter est homogène : une étude de formulation en laboratoire permet d'estimer les caractéristiques du matériau après retraitement, sans tenir compte toutefois des dispersions dues aux opérations de chantier.
- Si la structure à retraiter est hétérogène, on distingue à nouveau deux cas :
 - Soit le chantier est d'importance telle qu'il justifie une étude de formulation en laboratoire. Les matériaux utilisés sont alors prélevés sur une planche d'essais derrière la machine de traitement utilisée pour homogénéiser la structure ;
 - Soit l'importance du chantier ne justifie pas une étude de laboratoire. C'est le cas le plus fréquent dans le domaine des routes à faible trafic. Les caractéristiques mécaniques du matériau traité au ciment ou au liant hydraulique routier seront estimées à partir de l'expérience locale et des résultats obtenus sur des chantiers de retraitement antérieurs (cf §7.2).

5.1.4.3 - Etude de formulation

Elle a pour objectif de déterminer le dosage en ciment, ou en liant hydraulique routier, à incorporer au matériau (existant en place ou, le cas échéant, modifié par l'apport d'un correcteur granulométrique) pour que le matériau traité atteigne les performances mécaniques requises pour le dimensionnement. Celles-ci sont appréciées par la résistance à la traction directe (R_t) et par le module de déformation du matériau traité (E) à l'âge de 360 jours, paramètres indispensables au dimensionnement des chaussées.

S'il n'est pas possible, pour des raisons de délai, de mesurer les performances à 360 jours, le tableau 5 propose des valeurs indicatives de coefficients de correspondance pour des matériaux retraités au ciment normalisé (28 jours) et avec des liants hydrauliques routiers (60 jours). Dans tous les cas, il est souhaitable de mesurer les performances à 360 jours pour valider les hypothèses de départ.

Tableau 5 - Valeurs indicatives des coefficients de correspondances pour l'estimation des performances mécaniques (R_t et E) à 360 jours des matériaux retraités			
Liant	Âge (jours)	$R_t/R_{t_{360}}$	E/E_{360}
Ciment	28	0,60	0,65
LHR	60	0,78	0,82

La méthodologie de l'étude, définie par la série des normes NF P 98-114 parties 1, 2, 3, consiste à étudier la variation des paramètres R_t et E , mesurés à l'âge de 28 ou 60 jours, en fonction respectivement des dosages en ciment ou en liant hydraulique routier, des plages de variation des teneurs en eau et des compacités prévisibles sur le chantier, et de l'éventualité d'apparition de gel ou d'immersion.

Le couple (R_t , E_t) choisi permet, après avoir appliqué les coefficients de correspondances entre 28 ou 60 jours et 360 jours, de définir la classe de résistance du matériau retraits, selon la classification définie dans les normes NF EN 14227-1, NF EN 14227-5, NF EN 14227-10 et NF EN 14227-13 et qui est illustrée par la figure 19.

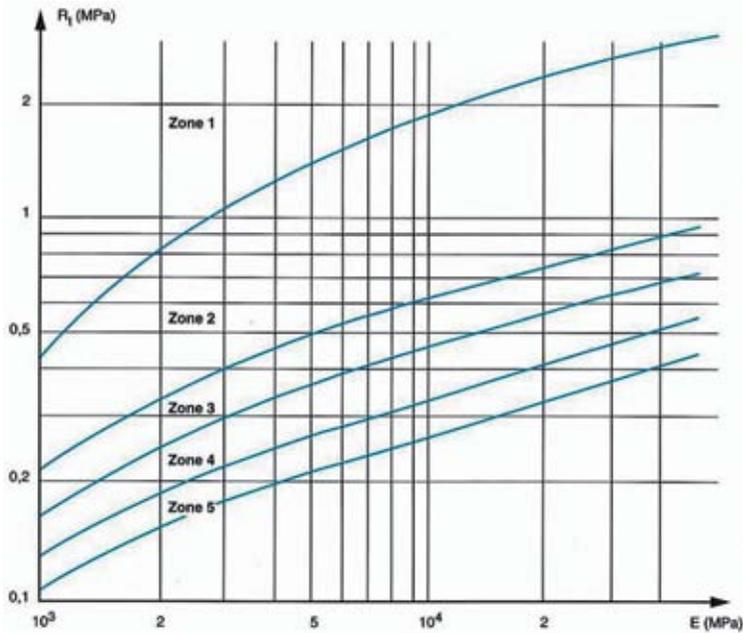
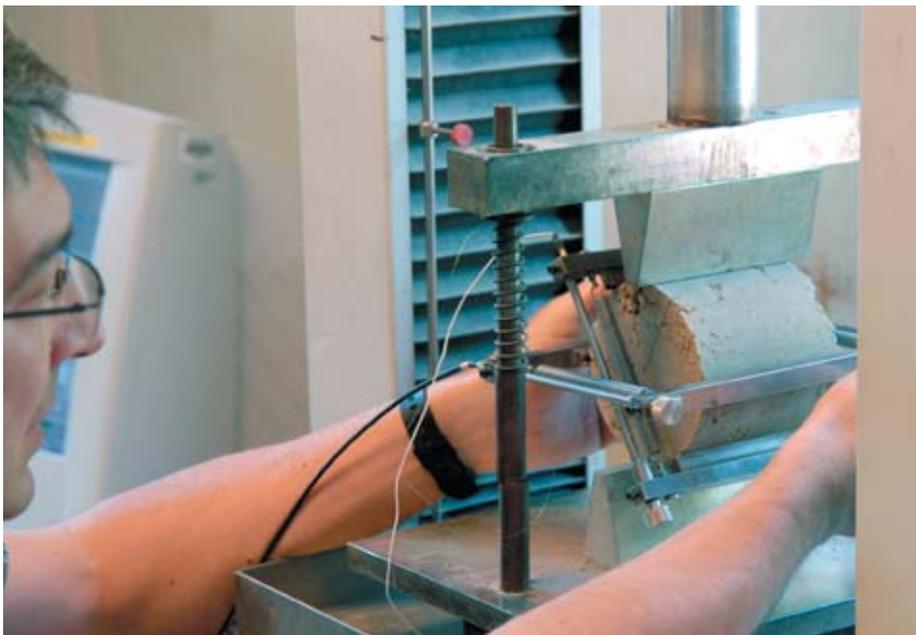


Figure 19 : Classification des matériaux traités aux liants hydrauliques.



Essai de traction par fendage d'une éprouvette de matériau traité.

À partir des valeurs moyennes à 360 jours obtenues en laboratoire sur la formule de base (qui sera la référence pour le chantier), on peut déduire les valeurs de σ_6 et du module E utilisées dans le calcul de dimensionnement en appliquant les coefficients de minoration suivants : 30% pour Rt_{360} et 10% pour E_{360} .

Les valeurs de σ_6 et de E seront donc calculées avec les relations suivantes :

$$\sigma_6 = 0,7 R_{t_{360}}$$

$$E = 0,9 E_{360}$$

5.2 - Analyse économique et environnementale

Une analyse économique et environnementale est nécessaire en amont de la consultation afin de décider si la technique de retraitement doit être proposée en solution de base ou en variante. La démarche d'appel d'offres en dépend. En effet, si la technique de retraitement est choisie comme solution de base, la responsabilité des études préliminaires incombe au maître d'œuvre. En revanche, si la technique de retraitement est choisie comme variante, il revient à l'entreprise d'assumer la responsabilité des études préliminaires qui doivent être réalisées bien avant le début des travaux. Le maître d'œuvre devra, dans ce cas, accorder un délai suffisant à l'entreprise pour mener à bien ces études.

Au moment de l'étude des offres des entreprises, une analyse globale doit être menée pour comparer les coûts et les impacts environnementaux directs, correspondant à la technique de retraitement et à la technique de renforcement, tels qu'ils ressortent des propositions des entreprises. Cette analyse soulignera, en outre, les avantages induits par la technique de retraitement et qui sont :

- La réduction de la consommation en granulats et matériaux d'accotement,
- La réduction des nuisances du trafic routier sur le réseau routier environnant,
- L'amélioration de la sécurité liée à la réduction du trafic de chantier,
- La préservation structurelle du réseau routier environnant par suite de la réduction du trafic de chantier,
- La réduction des émissions nocives et des gaz à effet de serre, par suite de la réduction des transports de matériaux.

L'analyse économique et environnementale pourra être menée en se basant sur la méthode présentée dans l'ouvrage « **Etude comparative en technique routière. Retraitement des chaussées en place vs renforcement. Méthode graphique de comparaison économique et environnementale** » [7], publié par CIMBETON ou en utilisant le **logiciel d'évaluation et de comparaison économique et environnementale en technique routière** [8], élaboré par CIMBÉTON et accessible sur le site : lhr.cimbeton.net

Le matériel de retraitement de chaussées

6.1 - Le matériel de retraitement : description et critères de performances

- 6.1.1 - Epandage du liant : description et critères de performances
- 6.1.2 - Machine de retraitement : description et critères de performances
- 6.1.3 - Le matériel de retraitement : niveaux de qualité

6.2 - Le matériel de compactage : description et critères de performances

- 6.2.1 - Le matériel de compactage : description
- 6.2.2 - Le matériel de compactage : niveaux de qualité

6.3 - Les prescriptions relatives à un chantier de retraitement

6.4 - Protection de la surface contre la dessiccation

6.5 - Préfissuration

Le retraitement en place est une technique qui fait appel à une grande variété de matériels. En effet, à chaque opération définie dans le retraitement-type, correspondent un ou plusieurs types de matériels. Il y a bien évidemment le matériel utilisé traditionnellement dans les travaux routiers tel la niveleuse, le compacteur, le gravillonneur, etc., mais aussi le matériel spécifique à la technique de retraitement tel l'épandeur de liant et le malaxeur. Le tableau 6 présente les matériels utilisés pour les différentes opérations de retraitement en place.

Tableau 6 - Liste des différents matériels utilisés pour le retraitement des chaussées en place aux liants hydrauliques

Opérations	But/moyen	Matériel classique
<i>Fragmentation</i>	Décohésionne l'ancienne chaussée	Ripper Fraiseuse Pulvimixeur
<i>Remise au profil</i>	Répartition uniforme des matériaux	Niveleuse
<i>Correction granulaire</i>	Apport de matériaux	Répandeur Finisseur Niveleuse
	Concassage	Raboteuse Concasseur en place ou mobile
	Écrêtage	Manuel Matériel agricole
<i>Épandage liant</i>	Ciment ou liant hydraulique routier : résistance à long terme	Épandeur à liants hydrauliques
<i>Humidification</i>	Obtention de la teneur en eau optimale Proctor	Rampe à eau avant le traitement Pulvérisation d'eau dans le malaxeur
<i>Malaxage</i>	Homogénéise le matériau	Rotobèche Pulvimixeurs à arbre horizontal Ateliers de reconditionnement
<i>Réglage</i>	Obtention de la cote définitive	Niveleuse
<i>Compactage</i>	Obtention de la densité	Compacteurs
<i>Couche de protection ou couche de surface</i>	Protection des assises traitées	Matériels courants

En ce qui concerne les opérations spécifiques (épandage, malaxage et compactage), il existe plusieurs types de matériels qui se distinguent par des performances différentes : épandeur (asservi ou non), pulvérisateur (fonctions et niveaux de puissances divers), compacteurs (classes variées). Il est, par conséquent, essentiel de bien choisir le matériel adapté au chantier à réaliser, la qualité du résultat obtenu en dépendant de façon considérable. **On parlera plus loin des niveaux de qualité de retraitement R1 et R2 (cf : § 6.1.3).**

Quelles machines doit-on utiliser pour le retraitement en place à froid des chaussées aux liants hydrauliques ?

On recherche à satisfaire les deux objectifs suivants :

- Sélectionner le matériel compte tenu de la qualité du matériau du site.
- Optimiser les contrôles *a posteriori* par l'adéquation entre choix du matériel et qualité des matériaux.

6.1 - Le matériel de retraitement : description et critères de performances

6.1.1 - Epandage du liant : description et critères de performances

L'épandage peut parfois se réaliser manuellement sur le sol préalablement quadrillé, chaque carré définissant la surface sur laquelle un sac complet doit être épandu. Cette solution est techniquement acceptable, mais n'est économiquement envisageable que pour des chantiers de petites tailles et d'accès difficiles.

Dès lors, la livraison de liants pour le retraitement des chaussées se fait systématiquement en vrac et l'apport de liant peut être réalisé de trois manières différentes :

- Par apport de liant pulvérulent à la surface de la chaussée à l'aide d'un épandeur devant la machine de fragmentation,
- Par apport de liant pulvérulent à l'aide d'une trémie installée sur la machine multifonction immédiatement devant le rotor de fragmentation,
- Par introduction du liant sous forme de suspension (eau + liant hydraulique) préparée dans un mélangeur mobile et injectée directement par une rampe, soit dans la chambre du rotor de fragmentation, soit dans la chambre de malaxage de la machine multifonction. Dans ce cas, la quantité d'eau est contrôlée par un débitmètre, le liant hydraulique par contrôle pondéral et la suspension par une pompe volumétrique.

6.1.1.1 - Les épandeurs : description

Les premiers épandeurs proposaient un dosage simple par unité de temps. La quantité de liant épandue dépendait donc de la vitesse d'avancement, elle-même fixée par le conducteur de l'épandeur.

Etant donné le manque de précision, une deuxième génération d'épandeurs a fait son apparition et dispose d'un système de dosage asservi à la vitesse d'avancement de l'engin, ce qui permet de définir à l'avance la quantité de liant épandue au mètre carré. Il existe des épandeurs à dosage pondéral (de moins en moins utilisés), où la vidange du liant est assurée par l'intermédiaire d'une vis d'extraction et contrôlée par un dispositif de pesage. On leur préfère aujourd'hui les épandeurs à dosage volumétrique où la vidange du liant est effectuée par voie pneumatique, gravitaire ou par fluidisation.

Pour les machines les plus modernes, le système de dosage volumétrique est pourvu d'une trémie de pesage, permettant un réglage encore plus précis de la quantité de liant épandue au mètre carré, donnant un mélange aux caractéristiques homogènes et correspondant de mieux en mieux aux exigences fixées en matière d'homogénéité et de performances mécaniques.



Épandeur moderne doté d'un système de dosage volumétrique associé à une trémie de pesage.

En outre, pour améliorer la précision du dosage, les options suivantes sont disponibles sur les épandeurs :

- Un système de marquage permettant au conducteur de garantir un bon parallélisme des épandages « bord contre bord », ou mieux encore, avec un chevauchement d'une dizaine de centimètres ;
- Une largeur d'épandage variable afin d'éviter le chevauchement trop important des bandes lorsque la largeur de la surface à traiter n'est pas un multiple exact de la largeur de l'épandeur ;
- Une alarme s'enclenchant lorsque la trémie est presque vide ;
- Un dispositif enregistrant la vitesse d'avancement de la machine et de rotation du tambour de mélange, ainsi que les paramètres d'étalonnage et les quantités de produit épandues. Ceci permet de réduire les contrôles manuels et d'augmenter la fiabilité générale.

6.1.1.2 - Les épandeurs : critères de performances

La performance d'un épandeur se juge par sa capacité à répartir le liant d'une façon homogène et précise, tant longitudinalement que transversalement. La qualité du dosage surfacique est appréciée par un **coefficient de variation du dosage longitudinal** « C_{VL} » et **transversal** « C_{VT} ». Ces coefficients sont fournis par les fabricants de ce type de matériel mais peuvent être contrôlés sur chantier pendant la mise en œuvre. On procède alors de la manière suivante :

- Des bacs métalliques de dimensions 0,50x0,50 m ou des bâches en caoutchouc de dimensions 1,00x1,00 m sont disposés selon un maillage précis sur la chaussée à retraiter avant le passage de l'épandeur,
- Le liant déposé dans les bacs ou sur les bâches pendant le passage de l'épandeur est pesé,

- Le C_{VL} est obtenu en effectuant **le rapport entre l'écart-type et la moyenne de trente pesées représentatives** d'une vidange complète de l'épandeur,
- Le C_{VT} est obtenu en effectuant **le rapport entre l'écart-type et la moyenne des mesures relevées sur trois profils en travers**, les bacs ou les bâches étant posés de manière jointive sur chacun des profils,
- **L'exactitude** est l'écart entre valeur moyenne épandue et valeur visée.

Compte tenu de l'existence sur le marché d'une grande variété de matériels d'épandage avec des performances plus ou moins bonnes en matière de précision et d'homogénéité d'épandage, une classification de ce matériel s'impose.

Trois critères de qualification, notés (par ordre croissant de qualité) de 1 à 3, définissent les performances des épandeurs :

- **L** : l'homogénéité Longitudinale de l'épandage du liant (en %)
- **T** : l'homogénéité Transversale de l'épandage du liant (en %)
- **V** : la possibilité de faire Varier la largeur d'épandage pour s'adapter à la largeur de travail imposée par la géométrie du chantier ou par la machine de fragmentation, évitant ainsi de créer des zones sous-dosées ou sur-dosées en liant.

L'homogénéité de l'épandage s'exprime, dès lors, par un coefficient de variation longitudinale « C_{VL} » et par un coefficient de variation transversale « C_{VT} ».

Le tableau 7 donne les critères de performances et de qualification des épandeurs.

Tableau 7 - Critères de performances et de qualification des épandeurs			
Valeur du critère	3	2	1
Homogénéité longitudinale L	$C_{VL} \leq 5\%$	$5\% < C_{VL} \leq 10\%$	$C_{VL} > 10\%$
Homogénéité transversale T	$C_{VT} \leq 10\%$	$10\% < C_{VT} \leq 20\%$	$C_{VT} > 20\%$
Variation de la largeur de l'épandage V	OUI	NON	NON

6.1.2 - Machine de retraitement : description et critères de performances

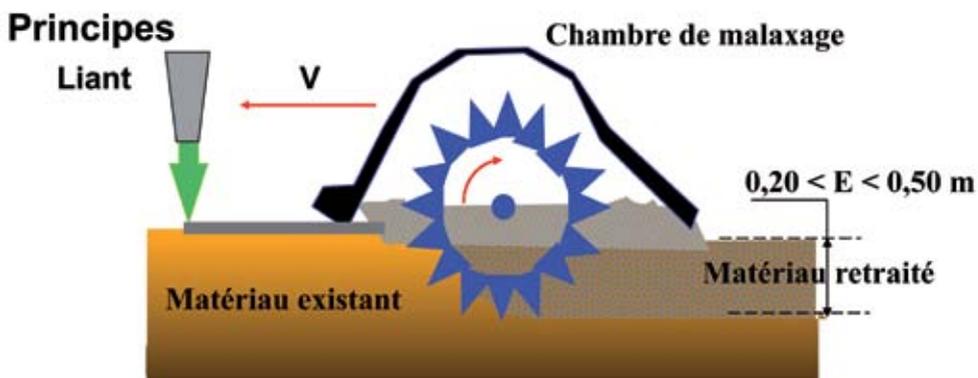
On peut citer, à cet égard :

- **Le matériel d'origine agricole, tel que les rotobêches**, pour le retraitement en place de routes à très faible trafic ;



Matériel d'origine agricole à efficacité limitée : faible puissance, mouture grossière, mélange hétérogène.

- **Le matériel tracté** pour le retraitement en place de routes à faible trafic ;
- **Les pulvérisateurs** : un matériel spécifique ou dédié pour le malaxage en place, performant, quelle que soit la nature du matériau de l'ancienne chaussée (y compris les matériaux traités). Il assure le décohesionnement de l'ancienne chaussée, la fragmentation du matériau existant et le malaxage en une seule passe. Le rotor tourne en sens inverse de celui de l'avancement de la machine. Les gros éléments sont soulevés et projetés sur une barre de fractionnement. La machine ramène le matériau ou le mélange et le dispose en un cordon central, lequel est ensuite étalé à la niveleuse (figure 20).



Le matériau de l'ancienne chaussée est mélangé au liant puis compacté.

Figure 20 : Schéma de fonctionnement d'un pulvérisateur.

- **Le matériel de reconditionnement des chaussées** : un matériel spécifique, de conception récente et intégrant, en un seul bloc, toutes les opérations de retraitement des anciennes chaussées qui sont effectuées en continu, sans intervention manuelle, depuis le défonçage de la chaussée jusqu'au compactage. Ce matériel, doté d'un malaxeur longitudinal, permet l'obtention d'une bonne homogénéité transversale du matériau retraité.



Ateliers de reconditionnement de chaussée : l'ARC 700 à gauche et l'ARC 1000 à droite.

6.1.2.1 - Les machines de retraitement : description

C'est grâce aux progrès technologiques du matériel de malaxage que le retraitement en place des chaussées a pu se développer. Utilisés pour la stabilisation des sols, les pulvérisateurs mélangeurs « pulvimixeurs » ont été adaptés pour être employés pour le retraitement des chaussées en place.

Ces engins à tambour horizontal sont des machines composées essentiellement d'une chambre de malaxage et d'un tambour de fragmentation dont l'axe horizontal est perpendiculaire à la direction du déplacement. Ce tambour est actionné hydrauliquement ou mécaniquement. Des vérins hydrauliques le plaquent contre la surface de la chaussée et l'enfoncent progressivement dans le revêtement jusqu'à la profondeur requise. Ce tambour est recouvert par la chambre de malaxage. La durée de ce mélange, et donc de la présence du matériau dans la chambre, dépend de la vitesse d'avancement.



Matériel tracté à faible encombrement : adapté aux chantiers d'accès difficile.

Ces pulvérisateurs mélangeurs ont évolué au cours des années et sont devenus aujourd'hui des outils de recyclage spécialisés. Ils sont conçus pour retraiter en un passage des revêtements d'une épaisseur atteignant 45 cm. Il s'agit donc de machines ultra puissantes, équipées de pneumatiques ou de chenilles. Elles peuvent peser jusqu'à 30 tonnes, les empêchant ainsi de se soulever lors du fraissage.

Le cœur de ces engins est formé par un tambour rotatif muni d'un nombre important de dents de découpe spéciales (fraise), pouvant être rapidement et facilement changées en cas d'usure.

Cette fraise tourne en sens inverse de l'avancement de la machine. Les dents arrachent donc le matériau vers le haut : le matériau est décohésonné et projeté contre une barre ou une plaque, ce qui accentue la fragmentation ou la pulvérisation. Ces machines sont capables de restituer un matériau à faible mouture et d'une grande homogénéité. La position du rotor est ajustable en hauteur.



Matériel moderne dédié, le pulvimixeur :
un engin lourd capable de traiter en un passage une forte épaisseur.

Durant le mélange et si nécessaire, de l'eau peut être introduite suivant un dosage précis. Plutôt que d'épandre le liant sous forme de poudre comme décrit plus haut, une pâte liquide (coulis) formée d'eau et de ciment peut être injectée directement dans la chambre de malaxage, évitant ainsi la production de poussière.

En France, des entreprises ont développé des ateliers de retraitement (ARC ou équivalent). ARC est l'acronyme de "Atelier de Reconditionnement de Chaussées". Il s'agit en effet d'un atelier intégrant toutes les opérations et pouvant les exécuter en un passage. Un des grands avantages de cette machine est la présence de deux rotors : le malaxage se fait aussi bien transversalement que verticalement, ce qui donne un produit fini particulièrement homogène.

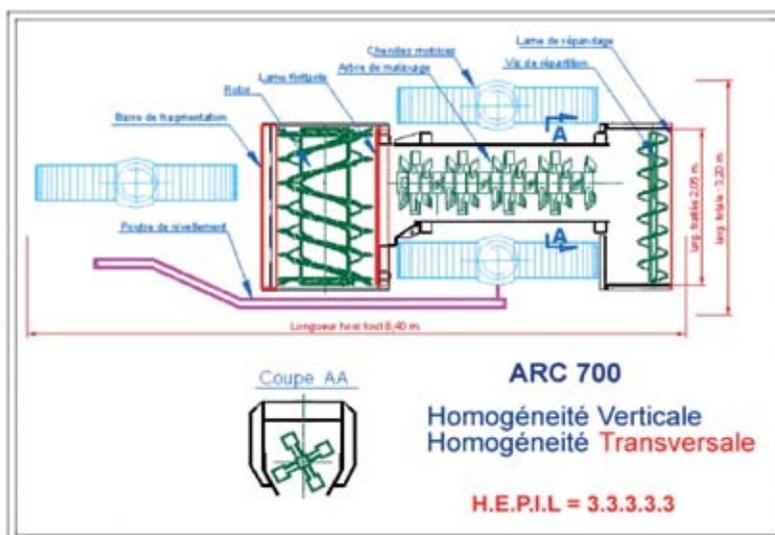


Figure 21 : Atelier de reconditionnement de chaussée :
le mélange se fait tant transversalement que longitudinalement.

6.1.2.2 - Les machines de retraitement : critères de performances

Quatre critères de qualification, notés (par ordre croissant de qualité) de 1 à 3, définissent les performances de ces matériels :

- **H** : la qualité d'**H**omogénéisation du mélange, suivant que le matériel dispose ou non d'un malaxeur associé au rotor de fraisage,
- **E** : la maîtrise de l'**E**paisseur de retraitement de la chaussée,
- **P** : la **P**uissance disponible pour fragmenter l'ancienne chaussée,
- **I** : la présence d'un dispositif d'**I**njection d'eau.

Suivant les machines, un cinquième critère peut être introduit :

- **E_l** : la possibilité de doser un liant sous forme liquide (**E**au + liant hydraulique)

La qualité du malaxage s'exprime, dès lors, en fonction de l'étendue de l'homogénéisation (sommaire, verticale, transversale), en fonction du coefficient de variation de l'épaisseur de matériau retraité « C_{VE} », en fonction du niveau de puissance disponible sur la machine pour fragmenter l'ancienne chaussée, en fonction de la disponibilité ou non d'un dispositif d'injection d'eau et des asservissements associés et enfin en fonction de la disponibilité ou non d'un dispositif de dosage du liant sous forme liquide et des asservissements associés. Le tableau 8 donne les critères de performances et de qualification des matériels de retraitement.

Tableau 8 - Critères de performances et de qualification des matériels de retraitement			
Valeur du critère	3	2	1
H	Homogénéisation dans le sens transversal et dans l'épaisseur traitée	Homogénéisation dans l'épaisseur traitée	Homogénéisation très limitée
E	Coefficient de variation de l'épaisseur < 5% avec une fonction supplémentaire ⁽¹⁾	Coefficient de variation de l'épaisseur ≤ 5%	Coefficient de variation de l'épaisseur > 5%
P	≥ 70 kW/ml	35 < P < 70	35 kW/ml
I	Liquide dans la chambre de malaxage possible + plage de débit suffisante + largeur variable + asservissement de la vitesse	Liquide dans la chambre de malaxage possible	Pas de possibilité d'injecter un liquide dans la chambre de malaxage
E⁽⁰⁾	Dosage du liant sous forme liquide + asservissement à la translation + pesée des constituants	Dosage du liant sous forme liquide + asservissement à la translation	Dosage du liant sous forme liquide sans asservissement à la translation

⁽¹⁾ Maintien de la profondeur quel que soit l'effort de fraisage demandé à la machine.

6.1.3 - Le matériel de retraitement : niveaux de qualité

En France, il a été défini deux niveaux de qualité de retraitement :

- **Le niveau de qualité de retraitement R1.** Il peut être obtenu quand on associe un pulvérisateur et un épandeur dont les coefficients de performances respectifs HEPIL et LTV respectent les exigences définies dans le tableau 9.

Tableau 9 - Matériels nécessaires pour l'obtention d'une qualité de retraitement de niveau R1

		3	2	1
Malaxeur	H		<i>Seulement si T = 3 et V = 3</i>	
	E			
	P			
	I			
	L			
<hr/>				
Épandeur	L			
	T		<i>Seulement si H = 3</i>	
	V			

Compactage : qualité q_1 si $t > T3$ ou q_2 si $t \leq T3$

Emploi de compacteurs V 5 ou V 4 et P2 (voire V 3 suivant l'épaisseur compactée)



Accepté



Accepté sous conditions



Refusé

- **Le niveau de qualité de retraitement R2.** Il peut être obtenu quand on associe un pulvérisateur et un épandeur dont les coefficients de performances respectifs HEPIL et LTV respectent les exigences définies dans le tableau 10.

Tableau 10 - Matériels nécessaires pour l'obtention d'une qualité de retraitement de niveau R2

		3	2	1
Malaxeur	H			
	E			
	P			
	I			
	L			
<hr/>				
Épandeur	L			
	T		<i>Seulement si H = 3</i>	
	V			

Compactage : qualité q_2

Emploi de compacteurs V 3 ou V 4 ou V 5 et P2



Accepté



Accepté sous conditions



Refusé

6.2 - Le matériel de compactage : description et critères de performances

En vue d'obtenir une surface plane, un nivellement grossier est réalisé immédiatement après le passage de la machine de retraitement. Le nivellement fin se fait après un certain nombre de passages du compacteur.



Le réglage à l'aide d'une niveleuse.

6.2.1 - Le matériel de compactage : description

En ce qui concerne le compactage, on a besoin, en règle générale, de trois différents compacteurs pour réaliser correctement cette opération. Tout d'abord, un compacteur lourd (à cylindre lisse ou à pieds dameurs) va travailler en grande amplitude de vibration pour assurer un bon compactage à la partie inférieure de la couche retraitée.



Le compacteur lourd assure la densification du matériau en fond de couche.

Lorsque l'on a obtenu un compactage suffisant et régulier en fond de couche (les deux-tiers inférieurs de la couche retraitée), on fait appel à nouveau à une niveleuse pour régler la couche à la hauteur définitive exigée.

Ensuite, un compacteur à cylindre lisse compactera, en faible amplitude de vibration, la partie supérieure de la couche retraitée.



Le compacteur à cylindre lisse assure la densification du matériau à la partie supérieure de la couche.

Une fois le compactage achevé, on fait appel à un compacteur à pneus afin d'exécuter la finition et d'obtenir une bonne fermeture en surface.



Le compacteur à pneus assure la bonne fermeture du matériau en surface et garantit ainsi une bonne finition.

Pour des épaisseurs supérieures à 25 cm, un compactage supplémentaire est requis. Pour ce faire, un compacteur à pneus ayant une masse par pneu de minimum 2,7 tonnes est utilisé. Le dernier compactage se fait à l'aide d'un rouleau lisse, sans vibrations, afin d'éviter l'écaillage de la surface. Le résultat du compactage est évalué par la masse volumique sèche qui doit égaliser, en fond de couche, au moins 95 % de la valeur de l'Optimum Proctor Modifié.

6.2.2 - Le matériel de compactage : niveaux de qualité

Pour le compactage des couches de chaussées, il existe deux qualités de compactage :

- **Un niveau de qualité de compactage q_1** (masse volumique moyenne $\geq 100\%$ de l'OPM ou masse volumique en fond de couche $\geq 98\%$ de l'OPM). Il correspond à la plus forte densification du matériau. Ce niveau ne peut être atteint qu'en utilisant des matériels vibrants de classe V4 ou V5 ou des compacteurs à pneus de la classe P2 conformément à la norme NF P 98 -736.
- **Un niveau de qualité de compactage q_2** (masse volumique moyenne $\geq 97\%$ de l'OPM ou masse volumique en fond de couche $\geq 95\%$ de l'OPM). Il peut être obtenu avec des compacteurs vibrants de la classe V3.

6.3 – Les prescriptions relatives à un chantier de retraitement

Le niveau de qualité d'un chantier de retraitement est défini par le maître d'œuvre en prenant en compte les critères suivants :

- La destination de la couche retraitée (couche de base ou couche de fondation),
- Le niveau de trafic escompté,
- La qualité du gisement de l'ancienne chaussée,
- Les performances des matériels de retraitement.

Le tableau 11 fixe les exigences de qualité du retraitement et du compactage en fonction de la couche de chaussée visée par le retraitement et du niveau de trafic escompté sur la chaussée.

Tableau 11 - Niveaux de qualités à prescrire pour un chantier de retraitement			
Cas de chantier		Qualité	
Fonction de la couche retraitée	Classe de trafic	de retraitement	de compactage
Liaison ou base	$T > T3$	R1	q_1
Liaison ou base	$T \leq T3$	R1	q_2 (admise)
		R2 (admise)	q_1
Fondation	Tous trafic	R1	q_2
		R2 (admise)	

6.4 - Protection de la surface contre la dessiccation

Il est impératif de protéger la couche retraitée contre la dessiccation le plus rapidement possible après le compactage. Cette opération se déroule en deux étapes :

- 1^{ère} phase : arrosage modéré à l'eau de la surface après le passage du dernier rouleau ;



Arroseuse à rampe.

- 2^{ème} phase : application d'une émulsion cationique de bitume au taux de $0,7 \text{ l/m}^2$ suivi d'un épandage de sable à raison de 3 kg/m^2 .



Protection contre la dessiccation par application d'une émulsion de bitume et sablage.

Cette deuxième phase est réalisée au plus tard en fin de journée. L'émulsion et le sable épandus peuvent faire office de couche de roulement temporaire pour un trafic léger ($< 3,5 \text{ t}$) et ce dans l'attente de la couche de surface définitive. Toutefois, dans ce cas de figure, il est préférable de prévoir plutôt la réalisation d'un enduit superficiel ou, si le niveau de trafic l'exige, une couche de surface en matériaux bitumineux.

6.5 - Préfissuration

Pour les routes à forte circulation, il est recommandé de réaliser des joints dans la couche retraitée afin de canaliser le retrait hydraulique. Plutôt que de scier les joints dans la couche durcie, il est possible de créer des rainures ou discontinuités dans le matériau fraîchement retraité. La distance entre les joints varie de 2 à 3 m.

Pour exécuter ces joints, des équipements ont été développés, qui permettent de les réaliser rapidement et économiquement :

- La première machine est une simple plaque vibrante munie sur sa face inférieure d'une lame. Elle est actionnée manuellement ou mécaniquement. La profondeur du joint doit être supérieure à la moitié de l'épaisseur de la couche. Les rainures sont créées avant le compactage final.
- Le système CRAFT (CRéation Automatique de Fissures Transversales) est un équipement installé sur un tractopelle et comprenant un bras articulé avec, à son extrémité, un outil de coupe ainsi qu'un réservoir pour l'émulsion. L'outil de coupe, composé d'une double lame, crée le joint et injecte ensuite l'émulsion de bitume.



La machine CRAFT en action.

- Le système OLIVIA consiste à introduire, dans la couche retraitée, une bande en plastique qui empêche les bords du joint ainsi formé de se recoller. Cette amorce permettra à la fissure de se poursuivre vers le bas.
- Le système " Joint Actif " prévoit de réaliser, dans la couche retraitée, une saignée dans laquelle est introduit un profilé ondulé en plastique rigide. La profondeur du joint correspond à l'épaisseur de la couche retraitée. Par contre, la hauteur du profil ne correspond qu'à environ deux tiers de cette épaisseur, de telle sorte qu'il se trouve au minimum à 5 cm sous la surface. La forme ondulée du profilé permet un transfert de charges entre les deux bords du joint.



La machine OLIVIA en action.



Système Joint Actif : réalisation d'une saignée sur toute la hauteur de la couche traitée.



Systeme Joint Actif : introduction du joint à profil ondulé.



Systeme Joint Actif : joints installés dans les saignées, prêtes à être refermées.

Le dimensionnement

7.1 - La méthode de dimensionnement

- 7.1.1 - Le trafic
- 7.1.2 - Choix de la couche de roulement
- 7.1.3 - Modélisation de la portance du sol support et, le cas échéant, de la partie conservée de l'ancienne chaussée
- 7.1.4 - Définition de la classe de résistance des matériaux retraités
- 7.1.5 - Calcul des contraintes admissibles
- 7.1.6 - Modélisation de la structure

7.2 - Justification de la structure

7.3 - Le contrôle du dimensionnement

7.4 - Résistance au gel et au dégel

- 7.4.1 - Choix de l'hiver de référence
- 7.4.2 - Calcul de l'indice de gel admissible IA
- 7.4.3 - Comparaison entre l'indice de gel de référence IR et l'indice de gel admissible IA

Il est un fait que les guides de conception et de dimensionnement [3] et [4] actuellement en vigueur en France ne mentionnent pas la technique de retraitement en place à froid des chaussées aux liants hydrauliques. Mais, le Guide technique CFTR sur le “Retraitement en place à froid des anciennes chaussées” [1] applique leurs principes méthodologiques et décrit, dans le « Livret II – Liants Hydrauliques », le processus à suivre pour réaliser une étude de dimensionnement.

En outre, le guide technique régional « Le retraitement en place à froid des anciennes chaussées - CETE Normandie Centre - DRE Haute-Normandie - mars 2000 » [6], apporte un éclairage intéressant sur l’expérience acquise dans la région de Normandie.

Pour une route à moyen ou fort trafic (trafic supérieur à T3), l’étude de dimensionnement doit être systématiquement réalisée selon la méthode développée dans le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussées SETRA/LCPC – 1994 » (cf. paragraphe 7.1 ci-après).

Pour les trafics inférieurs à T3, l’étude de dimensionnement peut ne pas être effectuée. Il faut alors justifier la structure du projet selon la méthode développée ci-après dans le paragraphe 7.2.

7.1 - La méthode de dimensionnement

La structure de la chaussée est considérée comme un système multicouche élastique dans lequel les matériaux sont caractérisés par leur module d’élasticité, le module de Poisson et les caractéristiques de réponse de fatigue. Les matériaux sont supposés être homogènes et isotropes. La couche la plus basse, considérée comme un massif semi-infini, représente la plate-forme (y compris la couche de forme, le cas échéant). Le calcul des contraintes et des déformations est basé sur les travaux théoriques de Burmister.

Il s’agit de fixer une période de service à assurer par la structure, définie comme la période probable pendant laquelle la chaussée supportera le trafic prévu sans devoir recourir aux travaux d’entretien. Le choix de la période de service intervient dans le calcul du trafic cumulé. Elle peut être prise entre cinq et quarante ans. Mais, comme nous allons le constater par la suite, le dimensionnement d’une chaussée retraitée aux liants hydrauliques - donc son coût initial - varie en fait assez peu en fonction de la période de service choisie. Il y a donc intérêt à retenir une durée longue (entre vingt et quarante ans).

La démarche de dimensionnement, appliquée à une chaussée retraitée, est alors conduite selon le processus suivant :

- Détermination du trafic,
- Choix de la couche de roulement,

- Modélisation de la portance du sol support et, le cas échéant, de la partie conservée de l'ancienne chaussée,
- Détermination de la classe de résistance du matériau retraité,
- Calcul des contraintes admissibles,
- Modélisation de la structure.

7.1.1 - Le trafic

Le trafic constitue un élément essentiel du dimensionnement des chaussées.

En effet, chaque passage de véhicule sur la chaussée entraîne une légère fatigue de celle-ci, aussi bien pour la structure que pour les qualités de surface.

L'accumulation de ces dommages élémentaires conduit à la dégradation progressive de l'ensemble. Le calcul de dimensionnement fait donc intervenir le trafic cumulé qui circule sur la chaussée durant la période de service prévue.

D'autre part, l'expérience a montré l'influence fondamentale du poids des essieux sur le dommage observé : un essieu de poids lourds est infiniment plus agressif qu'un essieu de voiture légère. Il est donc nécessaire de quantifier le trafic sur le plan de l'agressivité des véhicules. En France, le trafic estimé à la mise en service est converti en nombre d'essieux standards au moyen d'un coefficient multiplicateur qui tient compte de l'agressivité du type de véhicule. Le terme « essieu standard » désigne l'essieu isolé à roues jumelées supportant une charge de 13 tonnes, qui est la charge maximale légale en France.

Comme l'objectif de la chaussée est d'assurer le passage des véhicules pendant un certain nombre d'années, le calcul de dimensionnement fait donc intervenir le trafic cumulé, converti en « essieux standards », qui circule sur la chaussée tout au long de cette période.

Ce trafic cumulé à prendre en compte dépend alors :

- du trafic existant ou prévu lors de la mise en service de la route,
- de l'agressivité du trafic,
- de la période de service souhaitée de la chaussée,
- du taux moyen de croissance annuelle du trafic pendant cette période.

7.1.1.1 - Détermination du trafic à la mise en service

Il est évalué à l'aide de la formule :

$$t = [M.J.A.] \times K \times R$$

où :

t : est le trafic à la mise en service, exprimé en poids lourds de poids total autorisé en charge supérieur à 3,5 tonnes par jour et par sens de roulement.

[M.J.A.] : est le trafic Moyen Journalier Annuel.

K : est un coefficient de conversion en poids lourds.

R : est un coefficient prenant en compte le recouvrement des bandes de roulement.

• **Trafic moyen journalier annuel « M.J.A. »**

Il peut être évalué, selon le cas à étudier, de différentes façons :

- soit par comptage lorsqu'il s'agit de l'aménagement d'un itinéraire existant,
- soit par estimation du trafic basée sur une étude de trafic dans la zone intéressée par le projet,
- soit, enfin, par évaluation à partir de méthodes indirectes : tonnage transporté transformé en trafic ou estimation du trafic « drainé » par la nouvelle route à partir des itinéraires qu'elle déleste.

Dans le cas des routes à faible trafic, l'intensité du trafic et son agressivité varient dans de très larges proportions en fonction notamment de la nature de la voirie et de sa destination.

Citons, à titre d'exemples, certains cas courants :

- en milieu agricole, le trafic est saisonnier. Il peut être très lourd dans les zones de culture industrialisée ou léger dans les régions d'élevage,
- une route à caractère purement agricole peut constituer un raccourci entre deux villages et devenir un itinéraire de liaison qui sera amené à supporter un trafic plus élevé que prévu,
- le trafic sur les routes forestières est, en règle générale, réduit mais constitué exclusivement de poids lourds circulant en toute saison,
- sur les voiries de lotissements, le trafic lourd circule au moment de la construction des habitations. Le trafic ultérieur est en grande partie constitué de véhicules légers dont le nombre est étroitement lié à celui des habitations et n'est pas, de ce fait, sujet à évolution dans le temps.

Ces quelques exemples illustrent bien l'importance que revêt la fonction réelle de la route dans la détermination du trafic.

D'autre part, le temps disponible pour les études des projets de voiries étant le plus souvent limité, il n'est pas toujours possible de réaliser des comptages sur des périodes longues et représentatives. Les résultats obtenus sont, de ce fait, partiels et incomplets. Il convient donc, dans de tels cas, d'effectuer des corrections sur le trafic obtenu pour tenir compte des variations saisonnières connues (transport de betteraves, vendanges, vacances, etc.) et des augmentations temporaires de trafic (déviation).

Cette façon de faire est très intéressante car elle permet, en tenant compte des variations saisonnières du trafic et de la pondération de ces variations sur une année entière, d'estimer avec plus de précision le trafic moyen journalier annuel que la route aura à supporter.

Le trafic MJA est exprimé par sens de circulation, par ordre de préférence en :

- Poids lourds de poids total autorisé en charge > 3,5 t

- Poids lourds de charge utile > 5 t
- Essieux > à 9 t
- Tous véhicules.

Tableau 12 - Détermination du coefficient de conversion K en fonction de la nature du trafic MJA

NATURE DU TRAFIC MJA		K
Essieux supérieurs à 9 t		1,25
PL de charge utile > 5 t		1,25
PL de poids total autorisé en charge > 3,5 t		1
Tous véhicules	> 1000	0,125
	500 - 1000	0,088
	< 500	0,062

• Coefficient K

Ce coefficient permet de convertir le trafic MJA, mesuré lors de l'étude de trafic, en poids lourds de poids total autorisé en charge supérieur à 3,5 tonnes.

Le tableau 12 donne le coefficient K en fonction de la nature du trafic MJA.

Tableau 13 - Détermination du coefficient R en fonction de la configuration de la route

CONFIGURATION DE LA ROUTE	R
Route unidirectionnelle	1
Route bidirectionnelle de largeur > 6 m	1
Route bidirectionnelle de largeur 5 à 6 m	1,5
Route bidirectionnelle de largeur < 5 m	2
Route bidirectionnelle de largeur < 5 m circulée par des camions en charge dans un sens et à vide dans l'autre sens	1,5

• Coefficient R

C'est un coefficient de pondération lié à la largeur utile de la route. Il prend en compte le recouvrement des bandes de roulement dans le cas des chaussées bidirectionnelles à largeur réduite. Le tableau 13 donne le coefficient R en fonction de la configuration de la route.

7.1.1.2 - Classes de trafic

Tableau 14 - Classes de trafic pour les routes à faible trafic

Classes de trafic	Trafic à la mise en service (exprimé en poids lourds de poids total autorisé en charge > 3,5 t/jour et par sens)
T ₃	> 150
t ₃₊	85 à 150
t ₃₋	50 à 85
t ₄	25 à 50
t ₅	10 à 25
t ₆	0 à 10

A partir du trafic à la mise en service « t », exprimé en poids lourds de poids total autorisé en charge supérieur à 3,5 tonnes, on peut désigner la classe du trafic pour le sens de circulation étudié conformément à la définition des classes de trafic.

Le tableau 14 donne, à titre de rappel, les différentes classes de trafic.

7.1.1.3 - Détermination du trafic cumulé « N »

Le trafic cumulé « N », exprimé en nombre cumulé d'essieux standards, est déterminé par l'expression :

$$N = 365 t. C. A.$$

où :

365 t : représente le trafic de l'année de mise en service, « t » étant le trafic journalier moyen de l'année de mise en service ou classe de trafic.

C : est le facteur de cumul qui tient compte de la période de service choisie et du taux annuel de croissance du trafic.

A : est le facteur d'agressivité du trafic qui permet de convertir le trafic à la mise en service « t » en nombre d'essieux standards de 13 tonnes.

a) Détermination de C

Le facteur de cumul C est déterminé à partir des hypothèses fixées par le projeteur et concernant, d'une part, la période de service et, d'autre part, le taux annuel de croissance du trafic.

En désignant par n la période de service et par r le taux annuel de croissance du trafic, l'expression du facteur de cumul est donnée par :

$$C = \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

La détermination de C nécessite de choisir une période de service n et un taux annuel de croissance du trafic r. Ce choix appelle les commentaires suivants :

- période de service

Elle est définie comme la période probable pendant laquelle la chaussée supportera le trafic prévu sans devoir recourir à un entretien structurel.

Dans le cas des voiries, on retient en général l'hypothèse d'une période de service longue, au moins égale à vingt ans.

- taux annuel de croissance du trafic

En règle générale, il n'est pas facile d'évaluer ce taux d'une façon précise. Il dépend de plusieurs facteurs : les conditions économiques locales, la position stratégique de la route dans le réseau régional, etc.

Les valeurs du taux généralement retenues dans les projets se situent dans la fourchette 0-10 %. Dans le cas où l'on ne dispose pas de prévisions sur l'évolution probable du trafic, on retient de préférence un taux de 4 %. Le tableau 15 donne les valeurs du facteur de cumul C.

Dans le cas où l'on retient deux taux annuels de croissance du trafic : r_1 ($1 \rightarrow n_1$ ans) et r_2 ($n_1+1 \rightarrow n$ ans), le facteur de cumul C s'écrit :

$$C = C_1 (1 \rightarrow n_1) + (1 + r_1)^{n_1} \cdot C_2 (n_1+1 \rightarrow n)$$

$$C = [(1+r_1)^{n_1} - 1] 1/r_1 + (1+r_1)^{n_1} [(1+r_2)^{n-n_1} - 1] 1/r_2$$

le trafic au début de l'année (n_1+1) est égal au trafic initial multiplié par $(1+r_1)^{n_1}$.

Tableau 15 - Détermination du facteur de cumul « C »

Facteur de cumul C		Période de service « n » (en années)				
		20	25	30	35	40
Taux de croissance annuel du trafic r (en %)	0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0
	1	22,0	28,2	34,8	41,7	48,9
	2	24,3	32,0	40,6	50,0	60,4
	3	26,9	36,5	47,6	60,5	75,4
	4	29,8	41,6	56,1	73,6	95,0
	5	33,1	47,7	66,4	90,3	120,8
	6	36,8	54,9	79,1	111,4	154,8
	7	41,0	63,2	94,5	138,2	199,6
	8	45,8	73,1	113,3	172,3	259,0
	9	51,2	84,7	136,3	215,7	337,9
	10	57,3	98,3	164,5	271,0	442,6

b) Détermination de A

Il tient compte de la composition du trafic lourd. Il permet de convertir les poids lourds de charges utiles supérieures à 5 tonnes en équivalent d'essieux standards de 13 tonnes. Il a les valeurs suivantes (tableau 16) :

Tableau 16 - Valeurs du facteur d'agressivité A en fonction de la classe de trafic

Classes de trafic	Facteur d'agressivité A
$> T_3$	1
t_{3+}	0,8
t_{3-}	0,7
t_4	0,5
t_5	0,4
t_6	0,3

7.1.2 - Choix de la couche de roulement

Le guide CFTR [1] définit, en fonction de la classe de trafic, la nature et l'épaisseur minimale requises de la couche de roulement pour les structures en matériaux retraités aux liants hydrauliques. Le choix de la couche de roulement peut être fait conformément aux indications données dans le tableau 17.

Tableau 17 - Choix de la couche de roulement

Classe de trafic à la mise en service	Couche de roulement
t_6	Enduit superficiel
t_5	Enduit superficiel
t_4	4 cm de Béton Bitumineux (BB)
T_3 et T_2	6 cm de Béton Bitumineux (BB)
T_1	8 cm de Béton Bitumineux (en 2 couches)

Toutefois, le choix de la couche de roulement pourra être ajusté en fonction de l'expérience locale ou pour satisfaire les objectifs fixés par le maître d'ouvrage en termes de niveau de service.

7.1.3 - Modélisation de la portance du sol support et, le cas échéant, de la partie conservée de l'ancienne chaussée

Pour le retraitement en place, par "portance du sol support", il faut entendre la portance du sol au niveau conservé de l'ancienne chaussée, défini par l'épaisseur envisageable de retraitement.

La portance est soit mesurée à l'aide de l'essai de réaction à la plaque (module EV2), les mesures sont alors effectuées aux endroits où la chaussée existante a été rabotée ou déconstruite ; soit estimée par un calcul inverse effectué à partir des valeurs de déflexion mesurées sur l'ancienne chaussée, dans le cas où celle-ci est de type souple.

Si la partie restante de l'ancienne chaussée est composée de matériaux liés, son module d'élasticité est mesuré sur des échantillons prélevés par sondage. Si, en revanche, elle est composée d'un matériau non lié, son module est alors supposé égal à 4 fois celui du sol support, sans toutefois dépasser le seuil de 320 MPa.

7.1.4 - Définition de la classe de résistance des matériaux retraités

Le Guide technique CFTR sur le "Retraitement en place à froid des anciennes chaussées" [1] classe les matériaux retraités aux liants hydrauliques en zones de performance en fonction de leur résistance à la traction directe R_t et de leur module de déformation E_t , mesurés à l'âge de 360 jours. La figure 22 fournit les différentes zones de classement des matériaux traités aux liants hydrauliques.

Pour déterminer la zone de performance d'un matériau, il suffit de reporter sur l'abaque de la figure 22 les valeurs de R_t et de E_t , mesurées à l'âge de 360 jours.

Le classement mécanique des matériaux retraités est défini à partir des performances mécaniques des matériaux à 360 jours et de la qualité de retraitement envisagée. Selon la zone de performance obtenue et la qualité du retraitement envisagée, la classe de résistance du matériau retraité est donnée dans le tableau 18.

La connaissance des caractéristiques mécaniques des matériaux retraités aux liants hydrauliques permet ainsi de définir quatre classes possibles de matériaux de catégorie 2, 3, 4 ou 5.

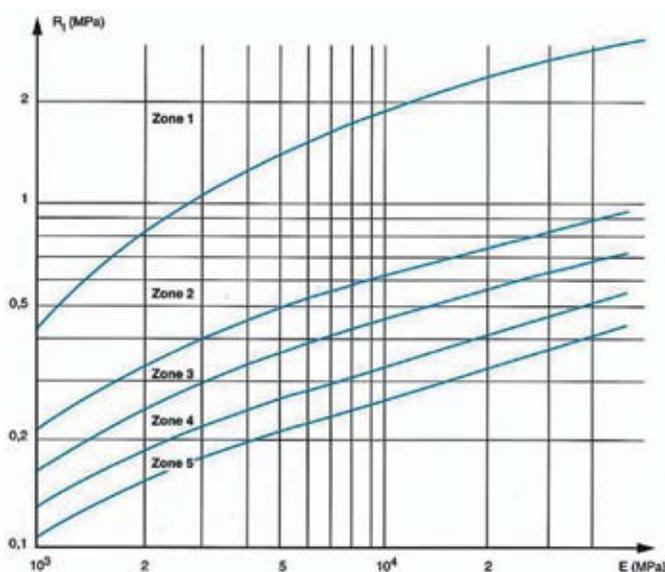


Tableau 18 - Classe de résistance	
Classe	Matériaux retraités en place
1	
2	Zone 1
3	Zone 2
4	Zone 3
5	Zones 4, 5

Figure 22 : Classification des matériaux retraités aux liants hydrauliques.

S'il n'est pas possible, pour des raisons de délai, de mesurer les performances mécaniques à 360 jours, le tableau 6 page 59 propose des valeurs indicatives de coefficients de correspondance pour des matériaux retraités au ciment (28 jours) et aux liants hydrauliques routiers (60 jours).

7.1.5 - Calcul des contraintes admissibles

On applique la démarche proposée dans le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussées » avec, en particulier, les valeurs suivantes pour les différents coefficients :

7.1.5.1 - Coefficient de calage

Il dépend du degré de consolidation du sol support et de la partie restante en place de l'ancienne chaussée. Si une consolidation normale a été atteinte, le coefficient de calage est pris égal à 1,6. Dans le cas contraire, la valeur 1,5 est retenue.

7.1.5.2 - Risque

À moins qu'un pourcentage précis de risque de calcul ait été choisi par le maître d'ouvrage, il est d'usage de prendre les risques indiqués dans le tableau 19.

Tableau 19 - Valeurs indicatives pour le risque d'échec, exprimé en %, en fonction de la classe de trafic prévisible				
Classe de trafic	$\leq T_3$	T_2	T_1	T_0
Risque d'échec (%)	12,5	7,5	5,0	2,5

7.1.5.3 - Les paramètres de fatigue

Dans le cas où aucun essai de résistance à la fatigue n'a été effectué, la contrainte de traction σ_6 et le module d'élasticité E sont estimés à partir des valeurs moyennes à 360 jours obtenues sur la formule de base qui sera la référence pour le chantier, en minorant les résultats de laboratoire de : 30 % pour R_{t360} et 10 % pour E_{360}

Ceci conduit aux relations :

$$\sigma_6 = 0,7 R_{t360}$$

$$E = 0,9 E_{360}$$

En outre, d'autres paramètres de dimensionnement tels la pente de la courbe de fatigue du matériau retraité, la dispersion sur les résultats en fatigue S_N et la dispersion sur l'épaisseur retraitée Sh sont nécessaires pour déterminer les contraintes admissibles. Ces données dépendent de la qualité du matériel de retraitement (définie dans le chapitre 6) et de la qualité des matériaux existants (M1 et M2). En l'absence de valeurs d'étude ou d'expérience antérieure, on pourra utiliser les valeurs fournies dans le tableau 20.

Tableau 20 - Valeurs indicatives des paramètres de dimensionnement pour des matériaux comprenant entre 10 et 20% de produits bitumineux				
Cas de chantier / Caractéristiques obtenues après abattement	Qualité de retraitement R1		Qualité de retraitement R2	
	Matériau M1	Matériau M2	Matériau M1	Matériau M2
Pente de la courbe de fatigue (-1/b)	16	16	16	16
Dispersion sur les résultats en fatigue S_N	1	1,5	1,5	1,5
Dispersion sur l'épaisseur Sh	3 ⁽¹⁾	3 ⁽¹⁾	5	5

(1) Valeur à prendre lorsque le retraitement est précédé d'un reprofilage de la chaussée. Sinon, prendre Sh = 4.

7.1.6 - Modélisation de la structure

Elle est réalisée à l'aide du logiciel ALIZÉ en introduisant :

- Les données du trafic,
- Les caractéristiques de la plate-forme,
- Les caractéristiques de la partie de l'ancienne chaussée conservée,
- Les caractéristiques mécaniques du matériau retraité sur la base des résultats de l'étude de formulation.

7.2. Justification de la structure

En l'absence d'étude de formulation, le dimensionnement de la structure à retraiter peut être seulement justifié à condition que soient réunis les deux critères suivants :

- Le projet étudié concerne une voirie à faible trafic ($Traffic \leq T3$),
- Le matériau à retraiter est propre et faiblement argileux, avec un $V_{BS} < 0,8$.

La justification du projet vis-à-vis des référentiels techniques peut être envisagée avec une estimation des performances attendues avec le matériau retraité. Pour cela, au terme de l'analyse du projet, on pourra retenir les valeurs de la contrainte σ_6 (contrainte à 1 million de cycles) et du module d'élasticité E, données dans le tableau 21, en fonction de la qualité du retraitement (R1 ou R2) et de la qualité du matériau (M1 ou M2).

Tableau 21 - Valeurs des performances mécaniques du matériau retraité à retenir pour le calcul de dimensionnement en fonction des qualités de retraitement et du matériau				
Cas de chantier Caractéristiques obtenues après abatement	Qualité de retraitement R1		Qualité de retraitement R2	
	Matériau M1	Matériau M2	Matériau M1	Matériau M2
Module E (MPa)	20 000	18 000	18 000	13 000
σ_6 (MPa) contrainte à 10^6 cycles	0,70	0,55	0,55	0,35

A partir de ces valeurs, des coefficients fournis dans le tableau 20 et en considérant qu'il ne reste rien de l'ancienne structure de chaussée, des fiches de structure en assises retraitées en place ont été calculées et figurent dans le guide technique « Retraitement en place à froid des anciennes chaussées » [1]. Ces fiches ont été calculées à l'aide du logiciel ALIZÉ en retenant les hypothèses suivantes :

- Dosage du liant hydraulique : 4 %,
- Trafic : t_5 ; t_4 ; t_{3-} ; t_{3+} ,
- Durée de vie : 20 ans,
- Accroissement annuel du trafic : 2 %,
- Portance du support : 50 ; 80 ; 120 MPa,
- Qualité du retraitement : R1 ou R2,
- Qualités du matériau : M1 ou M2,
- Energie de compactage : q_2 .

Pour une qualité de retraitement et une qualité de matériau données, les fiches de structures (tableaux 22, 23 et 24), extraites du guide technique « Retraitement en place à froid des anciennes chaussées », fournissent le dimensionnement de la structure retraitée en fonction de la portance du support et de la classe de trafic (t_5 , t_4 , t_{3-} , t_{3+}).

Tableau 22 - Fiche : R1 M1			
Hypothèses : $E = 20\,000$; $\sigma_6 = 0,7$; $S_N = 1$; $Sh = 3$; $-1/b = 16$; $Kc = 1,6$; $r = 12,5\%$ durée de vie = 20 ans ; accroissement trafic = 2%			
Portance support MPa \ Trafic en nombre de PL par sens	50	80	120
Trafic cumulé $0,74$ à $1,3 \cdot 10^6$ (de 85 à 150 PL/j/sens avec CAM = 0,8)	 6 30	 6 29	 6 25
Trafic cumulé $0,43$ à $0,74 \cdot 10^6$ (de 50 à 85 PL/j/sens avec CAM = 0,7)	 6 30	 6 28	 6 24
Trafic cumulé $0,22$ à $0,43 \cdot 10^6$ (de 25 à 50 PL/j/sens avec CAM = 0,5)	 4 30	 4 28	 4 25
Trafic cumulé 0 à $0,22 \cdot 10^6$ (jusqu'à 25 PL/j/sens avec CAM = 0,4)	 4 29	 4 27	 4 24

CAM : coefficient d'agressivité moyen

Tableau 23 - Fiche : R1 M2

Hypothèses : $E = 18\,000$; $\sigma_6 = 0,55$; $S_N = 1,5$; $Sh = 3$; $-1/b = 16$; $Kc = 1,6$; $r = 12,5\%$
 durée de vie = 20 ans ; accroissement trafic = 2%

Trafic en nombre de PL par sens	Portance support MPa		
	50	80	120
Trafic cumulé 0,74 à 1,3.10 ⁶ (de 85 à 150 PL/j/sens avec CAM = 0,8)	 6 36	 6 35	 6 30
Trafic cumulé 0,43 à 0,74.10 ⁶ (de 50 à 85 PL/j/sens avec CAM = 0,7)	 6 36	 6 34	 6 30
Trafic cumulé 0,22 à 0,43.10 ⁶ (de 25 à 50 PL/j/sens avec CAM = 0,5)	 4 36	 4 34	 4 30
Trafic cumulé 0 à 0,22.10 ⁶ (jusqu'à 25 PL/j/sens avec CAM = 0,4)	 4 34	 4 33	 4 29

Tableau 24 - Fiche : R2 M1

Hypothèses : $E = 18\,000$; $\sigma_6 = 0,55$; $S_N = 1,5$; $Sh = 5$; $-1/b = 16$; $Kc = 1,6$; $r = 12,5\%$
 durée de vie = 20 ans ; accroissement trafic = 2%

Trafic en nombre de PL par sens	Portance support MPa		
	50	80	120
Trafic cumulé 0,74 à 1,3.10 ⁶ (de 85 à 150 PL/j/sens avec CAM = 0,8)	 6 38	 6 36	 6 32
Trafic cumulé 0,43 à 0,74.10 ⁶ (de 50 à 85 PL/j/sens avec CAM = 0,7)	 6 37	 6 35	 6 32
Trafic cumulé 0,22 à 0,43.10 ⁶ (de 25 à 50 PL/j/sens avec CAM = 0,5)	 6 36	 6 34	 6 32
Trafic cumulé 0 à 0,22.10 ⁶ (jusqu'à 25 PL/j/sens avec CAM = 0,4)	 4 36	 4 34	 4 30

7.3 - Le contrôle du dimensionnement

Les études ont permis de définir, en fonction de la structure de l'ancienne chaussée, une épaisseur envisageable de retraitement.

Le contrôle du dimensionnement consiste à vérifier que cette épaisseur envisageable est au moins égale à l'épaisseur d'assise obtenue par la méthode de dimensionnement exposée ci-dessus. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si l'épaisseur envisageable est inférieure à l'épaisseur d'assise obtenue par la méthode de dimensionnement, on doit reconsidérer le mode de retraitement et envisager :

- soit l'apport de matériaux, nécessaire pour obtenir l'épaisseur d'assise définie par le dimensionnement ;
- soit l'augmentation du dosage du ciment ou du liant hydraulique routier ;
- soit l'augmentation de l'épaisseur de la couche de surface en béton bitumineux.

7.4 - Résistance au gel et au dégel

Si une vérification de la tenue au gel/dégel de la nouvelle chaussée retraitée est demandée par le maître d'ouvrage, elle se fait selon la méthode décrite dans le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussées LCPC/SETRA, Décembre 1994 » [4]. Il est à noter que les matériaux retraités au ciment ou aux liants hydrauliques routiers présentent une bonne insensibilité au gel. L'indice de gel annuel total est défini comme le nombre cumulé de « degrés x jours », jours où la température de l'air est en-dessous du zéro degré Celsius. Vérifier que la chaussée sera en mesure de résister aux effets du gel/dégel consiste à comparer :

- L'indice de gel atmosphérique choisi comme référence, IR, qui caractérise la sévérité de l'hiver contre lequel la chaussée doit être protégée,
- Et l'indice de gel que la chaussée est capable de supporter, appelé Indice de gel admissible IA. Cet indice est évalué en fonction de la susceptibilité au gel du sol support et la protection thermique et mécanique apportée par la chaussée.

Si IA est supérieur ou égal à IR, la vérification est positive, la structure est retenue.

Si IA est inférieure à IR, la vérification est négative, la structure est insuffisante. Des barrières de dégel doivent être installées pendant la période de dégel, sans quoi on reprendra l'ensemble du processus de vérification au gel/dégel après avoir :

- soit augmenté l'épaisseur des matériaux non gélifs de la plate-forme,
- soit diminué la sensibilité au gel des matériaux de la plate-forme par un traitement approprié,
- soit augmenté l'épaisseur de la structure de chaussée (classe de trafic supérieure ou classe de plate-forme inférieure).

7.4.1 - Choix de l'hiver de référence

Il est choisi par le gestionnaire du réseau routier, en fonction de sa politique en matière de barrières de dégel. Il peut choisir la rigueur de l'hiver contre laquelle il souhaite assurer une protection de la chaussée. Elle peut être contre :

- **Un hiver rigoureux exceptionnel** : hiver le plus rigoureux jamais enregistré sur la région,
- **Un hiver rigoureux non exceptionnel** : hiver rigoureux que l'on peut rencontrer au moins une fois par décennie sur la région.

L'annexe 2 de la notice d'utilisation du « *Catalogue des structures types de chaussées neuves* » [10] fournit les indices de gel des hivers exceptionnels et des hivers rigoureux non exceptionnels pour les principales stations météorologiques françaises sur la période 1951 - 1997.

7.4.2 - Calcul de l'indice de gel admissible IA.

La détermination de l'indice de gel admissible IA s'effectue de la manière suivante :

- **Évaluation de la sensibilité au gel de la plate-forme support de la chaussée** : cette étape consiste à évaluer la sensibilité au gel de la plate-forme, par la détermination de :
 - la protection thermique, traduite par la quantité de gel Q_{ng} , apportée par les matériaux non gélifs de la couche de forme et du support,
 - la quantité de gel Q_g dont on autorise la transmission aux couches inférieures gélives du support.
- **Analyse de nature mécanique** : en acceptant que la structure de la chaussée, établie sur un support gélif, subisse un surcroît de dommage limité pendant les périodes de dégel, on peut admettre une certaine pénétration du gel dans le support gélif. On associe à cette dernière la quantité de gel Q_M .
- **Détermination de la quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme** : la quantité de gel Q_{pf} tenue pour admissible au niveau de la plate-forme support de chaussée est déduite des termes précédents par la relation :

$$Q_{pf} = Q_{ng} + Q_g + Q_M$$

- **Évaluation de la protection thermique apportée par la structure de chaussée** : l'étude de la transmission du gel au travers de la structure de la chaussée permet de déterminer la relation entre l'indice de gel de surface IS et l'indice de gel transmis à la base de la chaussée :

$$I_t = f(IS)$$

- **Détermination de l'indice de gel atmosphérique admissible IA pour la structure de la chaussée** : la quantité de gel Q_{pf} admissible au niveau de la plate-forme détermine l'indice de gel qui peut être transmis à la base de la structure de

la chaussée, ces deux grandeurs étant liées par :

$$Q_{pf} = \sqrt{It}$$

A partir de la relation entre It et IS déterminée à l'étape précédente et de celle qui lie l'indice de gel atmosphérique, on en déduit la valeur admissible IA correspondant à Q_{pf} .

7.4.2.1 - Évaluation de la susceptibilité au gel de la plate-forme support

• Calcul de la quantité de gel admissible Q_g transmise aux matériaux gélifs du support

Selon leur nature, les sols et matériaux granulaires sont plus ou moins sensibles au phénomène de cryosuction que l'on apprécie par un essai de laboratoire, l'essai de gonflement au gel, selon la norme NF P 98-234-2. La valeur de la pente de la courbe de gonflement détermine la classe de sensibilité au gel :

SG_n : matériaux non gélifs ;

pente de la courbe de gonflement inférieure à $0,05 \text{ mm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{h})^{1/2}$

SG_p : matériaux peu gélifs ;

pente de la courbe de gonflement : entre $0,05$ et $0,4 \text{ mm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{h})^{1/2}$

SG_t : matériaux très gélifs ;

pente de la courbe de gonflement : supérieure à $0,4 \text{ mm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{h})^{1/2}$.

Les matériaux traités au ciment ou aux liants hydrauliques routiers sont pour leur part insensibles au gel, sous réserve que leur résistance à la compression diamétrale selon la norme NF P 98-232-3 soit au moins de $0,25\text{MPa}$ au moment où ils seront susceptibles d'être soumis au gel.

Une fois la sensibilité au gel des différents matériaux déterminée, la plate-forme est découpée en couches de même classe de sensibilité au gel. Pour les besoins de la vérification au gel/dégel, on représente la plate-forme géométriquement par un modèle dans lequel la sensibilité au gel croît avec la profondeur. Cela est obtenu :

- en assimilant à des matériaux peu gélifs, les matériaux non gélifs situés sous une couche peu gélive,
- en assimilant à des matériaux très gélifs, les matériaux peu gélifs ou non gélifs situés sous une couche de matériaux très gélifs.

• Calcul de la protection thermique Q_{ng}

La valeur de Q_{ng} est donnée par la formule : $Q_{ng} = An \times [hn^2/(hn+10)]$

avec hn : épaisseur de la couche non gélive en cm,

An : coefficient dépendant de la nature du matériau de couche de forme (unité $\sqrt{(^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour})/\text{cm}}$) dont les valeurs sont données dans le tableau 25.

Tableau 25 - Valeurs des coefficients An
(Extrait du Guide Conception Dimensionnement des chaussées- SETRA/LCPC - 1994)

	Matériau selon la norme NF P 11 300 « Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières »				
	Sols fins (A)	Sols sableux ou graveleux avec fines (B) et sols comportant des fines et des gros éléments (C)	Sols insensibles à l'eau (D)	Limon traité à la chaux et au ciment LTCC	Sable ciment SC ou sable liant hydraulique routier SLHR
An [(°C.jour)/cm] ^{1/2}	0,15	0,13	0,12	0,14	0,17

7.4.2.2 - Analyse de nature mécanique, calcul de QM

Cette deuxième étape correspond à l'analyse mécanique de la chaussée dans les périodes où la capacité portante du support de la plate-forme est réduite en raison de l'augmentation de la teneur en eau causée par le dégel. La chute de portance engendre, dans le corps de chaussée, des sollicitations plus fortes que celles observées en période normale.

Avec les chaussées épaisses (couches liées supérieures à 20 cm), on pourra admettre une certaine pénétration du gel dans les couches gélives du support, en limitant l'accroissement des sollicitations qui en résulte durant les périodes de dégel. Ceci conduit à accepter que soit transmise au niveau de la plate-forme support une certaine quantité de gel notée Q_M , en plus des termes Q_g et Q_{ng} . Les chaussées qui répondent à cette condition sont celles dont les épaisseurs cumulées de matériaux traités aux liants hydrauliques et aux liants hydrocarbonés à chaud sont supérieures à 20 cm.

Pour les chaussées peu épaisses (couches liées d'épaisseur inférieures à 20 cm), Q_M est nul. Les graves non traitées et la grave émulsion sont considérées comme des matériaux non liés.

7.4.2.3 - Quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme

La quantité de gel Q_{PF} tenue pour admissible au niveau de la plate-forme support de chaussée est déduite des termes précédents :

$$Q_{PF} = Q_g + Q_{ng} + Q_M$$

7.4.2.4 - Evaluation de la protection thermique apportée par la structure de chaussée

Cette étude permet de déterminer l'indice de gel I_t transmis à la base de la structure de chaussée en fonction de l'indice de gel I_S à la surface de la chaussée. Deux approches sont envisageables selon le degré de précision recherché pour l'analyse :

- soit le calcul thermique de propagation du gel dans la chaussée, avec le code de calcul GEL1D [9])
- soit l'utilisation de relations simplifiées.

• **Méthode simplifiée**

Pour une structure de chaussée homogène, d'épaisseur h, on admettra une expression de la forme :

$$\sqrt{IS} = (1 + ah) \sqrt{It} + bh$$

a et b étant des coefficients dépendant de la nature du matériau et dont les valeurs sont données dans le tableau 26.

Tableau 26 - Valeurs des coefficients a et b pour différents types de matériaux routiers (Extrait du Guide Conception Dimensionnement des chaussées- SETRA/LCPC - 1994)					
Coefficients a et b (°C.jour) ^{1/2} / cm	Matériaux				
	Matériaux hydrauliques BC ; GC ; GLHR	Grave non traitée GNT	Matériaux bitumineux GB ; BB	Sable hydraulique SC ; SLHR	Sol liants hydrauliques STC ; STLHR
a	0,008	0,008	0,008	0,012	0,012
b	0,10	0,10	0,06	0,15	0,14

Les calculs thermiques permettent de déterminer le rapport entre l'indice de gel de surface IS et l'indice de gel transmis au substrat (It). Dans le cas d'une chaussée composée de plusieurs couches de matériaux différents, a et b sont obtenus à partir des équations :

$$a = \frac{\sum_i a_i h_i}{\sum_i h_i} ; b = \frac{\sum_i b_i h_i}{\sum_i h_i}$$

où hi est l'épaisseur de la couche i,

ai et bi les coefficients pour le matériau formant la couche i.

• **Méthode de calcul GEL 1D**

La propagation est modélisée à l'aide du logiciel de calcul GEL 1D mis au point par le LCPC sur la base de l'analyse de Fourier. Tout d'abord, les données d'entrée sont la géométrie de la structure et les caractéristiques thermiques de chaque couche. Ces dernières sont donnés dans le tableau 27.

Tableau 27 - Caractéristiques des matériaux de chaussées et du sol support adoptées pour le calcul de la propagation du front de gel dans une structure de chaussée
(Extrait du guide technique Conception et dimensionnement des structures de chaussées SETRA/LCPC 1994)

Matériaux	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Teneur en eau W (%)	Conductivité thermique du matériau non gelé λ_{ng} (w/m°C)	Conductivité thermique du matériau gelé λ_g (w/m°C)
Béton Bitumineux BB	2 350	1	2,00	2,10
Grave Bitume GB	2 350	1	1,90	1,90
Sable Bitume SB	1 990	5,5	1,50	1,70
Grave Ciment GC	2 250	3	1,80	1,90
Sable Ciment SC	1 900	8	1,42	1,66
Grave Liant Hydraulique Routier GLHR	2 250	3	1,80	1,90
Sable Liant Hydraulique Routier SLHR	1 900	8	1,42	1,66
Grave Non Traitée GNT	2 200	4	1,80	2,00
Béton de Ciment BC	2 300	3	1,70	1,90
Sol support A	1 300	32	1,10	1,80

Les conditions initiales de température imposées à la chaussée sont définies par le profil illustré dans la figure 23. La température est supposée être de 1°C en surface de la chaussée, et varie linéairement jusqu'à 14°C à 10 m de profondeur sous la surface de la plate-forme. Elle est maintenue égale à 14°C au-delà de cette profondeur. La loi de variation de la température au cours du temps est hyperbolique, la pente initiale étant égale à -0,833°C/h.

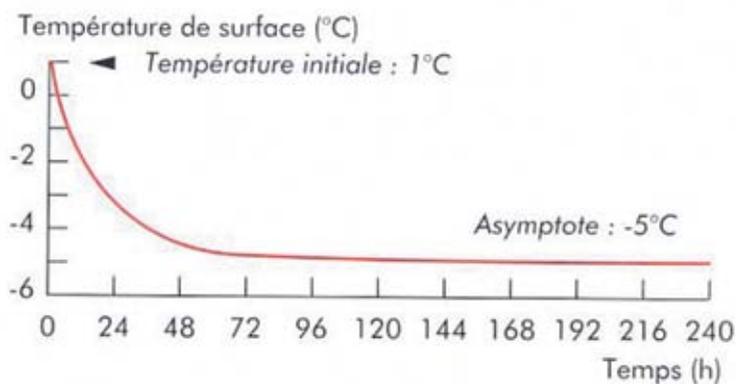


Figure 23 : Classification des matériaux retraités aux liants hydrauliques.

7.4.2.5 - Détermination de l'indice de gel atmosphérique admissible IA

• **Relation entre l'indice de gel de surface et l'indice de gel atmosphérique**

À moyenne altitude, avec un ensoleillement faible à moyen et un indice de gel atmosphérique ne dépassant pas 210°C.j, les phénomènes de convection et rayonnement en surface de la chaussée sont pris en compte par la relation :

$$IS = 0,7 (I_{Atm} - 10)$$

avec :

IS : indice de gel en surface de la chaussée (°C.jour)

I_{Atm} : indice de gel atmosphérique (°C.jour).

• **Indice de gel admissible IA**

La quantité de gel Q_{PF} admissible au niveau de la plate-forme détermine l'indice de gel It qui peut être transmis à la base de la structure de chaussée :

$$Q_{PF} = \sqrt{It}$$

$$\text{avec } Q_{PF} = Q_{ng} + Q_g + Q_M$$

A partir du calcul thermique, on détermine la valeur de IS associée à Q_{PF} .

L'indice de gel atmosphérique IA, correspondant à IS et admissible pour la structure, s'en déduit selon la relation :

$$IA = IS/0,7 + 10$$

7.4.3 - Comparaison entre l'indice de gel de référence IR et l'indice de gel admissible IA

Si IA est supérieur à IR, la vérification est positive, la structure est retenue.

SI IA est inférieur à IR, la vérification est négative, la structure est insuffisante.

3 solutions se présentent :

- soit augmenter l'épaisseur des matériaux non gélifs de la plate-forme ou diminuer la sensibilité au gel des matériaux gélifs par un traitement approprié,
- soit choisir une nouvelle structure de chaussée plus épaisse (classe de trafic

supérieure ou classe de plate-forme inférieure),

- soit envisager la pose de barrières de dégel.

Rappel : l'annexe 2 de la notice d'utilisation du « *Catalogue des structures types de chaussées neuves* » [10] fournit les indices de gel des hivers exceptionnels et des hivers rigoureux non exceptionnels pour les principales stations météorologiques françaises sur la période 1951 - 1997.

Exemples de dimensionnement

8.1 - Premier projet

- 8.1.1 - Évaluation du trafic cumulé « TC »
- 8.1.2 - La structure de chaussée en place
- 8.1.3 - Les hypothèses de dimensionnement
- 8.1.4 - Solution d'entretien avec le retraitement en place au liant hydraulique
- 8.1.5 - Solution de reconstruction en matériaux bitumineux

8.2 - Deuxième projet

idem premier projet

8.3 - Troisième projet

idem premier projet

8.4 - Choix de la solution d'entretien

- 8.4.1 - La comparaison économique
- 8.4.2 - La comparaison environnementale

Ce chapitre est destiné à familiariser le lecteur avec l'utilisation de la méthode de dimensionnement des structures de chaussées retraitées en place et exposées dans le présent guide.

On se propose donc, en suivant la démarche indiquée au chapitre 7 du présent guide, de définir la technique d'entretien de la chaussée la plus adaptée sur le plan technique, économique et environnemental.

Ce chapitre présente donc trois projets fictifs, mais aussi réalistes que possible. Ils constituent ainsi des cas d'école et sont rédigés avec le souci d'être les plus complets possibles et d'illustrer les cas extrêmes quant aux choix à opérer sur les différents paramètres d'entrée.

8.1 - Premier projet

Une commune rurale, d'environ 5000 habitants, dispose sur son territoire d'une zone agricole produisant annuellement 200 000 t de betteraves. Le développement constant de cette activité contribue certes au dynamisme de l'économie locale, mais il entraîne aussi une importante circulation de poids lourds sur la route départementale traversant la commune. Ceci a généré une dégradation de la structure routière dont l'état est devenu inacceptable pour les usagers à cause de l'inconfort et de l'insécurité. La réfection de la route de 5 km de longueur et de 7,50 m de largeur s'imposait donc. Regroupant cinq communes, le district urbain finance ces travaux avec l'aide du Conseil général, de l'État et de l'Union européenne. Compte tenu de la localisation géographique de la route (zone à gel modéré) et comme l'essentiel du trafic est lié à l'activité agricole et que cette dernière se concentre sur les mois d'octobre et novembre, il n'a pas été jugé utile de mettre hors gel la nouvelle structure de chaussée. On se propose donc, en suivant la démarche indiquée au chapitre 7 du présent guide, de déterminer le dimensionnement mécanique de la chaussée à retraiter.

8.1.1 - Évaluation du trafic cumulé « TC »

On recherche d'abord le trafic à la mise en service « t », puis le trafic cumulé « TC ».

8.1.1.1 - Trafic à la mise en service « t »

Les comptages réalisés sur la route départementale traversant la commune donnent une estimation du nombre de poids lourds PL d'un poids total autorisé en charge supérieur à 3,5 t qui circulent sur l'actuelle route. Ces comptages ont été effectués durant le mois de mars pendant quinze jours consécutifs, sur un sens de circulation, donnant un chiffre de 25 poids lourds par jour et par sens.

8.1.1.2 - Trafic moyen journalier annuel (MJA) à la mise en service

Il s'agit d'apporter ici les corrections au trafic obtenu par comptage. On estime que pendant les mois de décembre, janvier et février, le trafic lourd diminue de 50 % par rapport à celui de mars pris pour référence. Par ailleurs, le transport lié à l'activité agricole, qui se concentre sur les mois d'octobre et novembre, engendre durant cette période un trafic poids lourds cinq fois supérieur à celui du mois de mars. Le trafic moyen journalier annuel (MJA) de l'année de comptage est alors :

$$\text{MJA} = 25 \text{ PL} (7 \text{ mois} \times 1 + 2 \text{ mois} \times 5 + 3 \text{ mois} \times 0,50) \times 30/365$$

$$\text{MJA} = 38,01 \text{ PL soit } 39 \text{ PL/j/sens}$$

D'où MJA = 39 PL/j/sens.

On prévoit que la remise en service de la route aura lieu au printemps de l'année suivant celle du comptage. On estime, d'autre part, que la croissance du trafic liée à l'activité agricole est de l'ordre de 2 % par an. Le trafic MJA à la mise en service sera donc :

$$\text{MJA} = 39 \times 1,02$$

$$\text{MJA} = 39,78 \text{ PL/j/sens}$$

Soit MJA = 40 PL/j/sens

8.1.1.3 - Trafic « t » à la mise en service

L'expression du trafic à la mise en service est :

$$t = \text{MJA} \times R$$

où R est un coefficient de pondération lié à la largeur utile de la route. Il prend en compte le recouvrement des bandes de roulement dans le cas des chaussées bidirectionnelles à largeur réduite. Or, dans le présent projet, la chaussée est bidirectionnelle mais sa largeur est égale à 7,50 m. Donc, il n'y a pas normalement de recouvrement des bandes de roulement, et par suite : $R = 1$

D'où: $t = \text{MJA}$

$t = 40 \text{ PL/j/sens}$

8.1.1.4 - Détermination du trafic cumulé « TC »

L'expression du trafic cumulé s'écrit :

$$\text{TC} = 365 \times t \times C$$

où t est le trafic journalier à la mise en service

et C est le facteur de cumul développé et qui s'exprime par :

$$C = [(1 + r_1)^{n_1} - 1] + (1 + r_1)^{n_1} [(1 + r_2)^{n_2} - 1] r_1 r_2$$

En ce qui concerne la période de service, on a retenu pour ce projet une durée de 20 ans.

En matière de taux annuel de croissance du trafic, on a pris les hypothèses suivantes :

- un taux de 2 % pendant les 10 premières années ;
- un taux de 3 % pour la période s'étalant entre la 11^e et la 20^e année.

En appliquant l'expression du facteur de cumul « C », on obtient :

$$C (1 \rightarrow 20 \text{ ans}) = C1 (1 \rightarrow 10 \text{ ans}) + 1,02^{10} \times C2 (11 \rightarrow 20 \text{ ans})$$

$$C = [(1 + 0,02)^{10} - 1] + (1,02)^{10} [(1 + 0,03)^{10} - 1] 0,02 \times 0,03$$

$$C = 24,90$$

Le trafic cumulé sur 20 ans est alors :

$$TC = 365 \times t \times C$$

$$TC = 365 \times 40 \times 24,90$$

$$\text{Soit : } 363\,540 \text{ PL/sens}$$

Avec PL est un poids lourd de poids total autorisé en charge supérieur à 3,5 t.

Le trafic cumulé peut aussi être exprimé en nombre d'essieux standards :

$$NE = TC (PL) \times CAM$$

Pour les structures retraitées et pour des routes dont le trafic est T4 (compris entre 25 et 50 PL/j), le CAM est égal à 0,5. D'où:

$$NE = 363\,540 \times 0,5$$

$$NE = 181\,770 \text{ Essieux Standards.}$$

8.1.2 - La structure de chaussée en place

8.1.2.1 - La constitution de la structure existante

Les sondages ont montré que la structure de chaussée en place est constituée de :

- Une couche de surface en béton bitumineux, d'épaisseur 5 cm,
- Une couche de base en Grave Non Traitée GNT, d'épaisseur 25 cm,
- Une arase de classe AR1, constituée d'un limon argileux de type A1 non traité.

8.1.2.2 - Les caractéristiques de la structure existante

Les mesures de déflexion sur la chaussée existante ont donné :

- Déflexion moyenne mesurée sur site : $\sim 200 / 100^{\text{ième}}$ mm
- Déflexion caractéristique : $400 / 100^{\text{ième}}$ mm,
(Rappel : $D_{\text{caract}} = D_{\text{moy}} + 2 \times \text{écart type}$).

Ce niveau de déflexion caractérise une chaussée souple. Une modélisation à rebours

de cette structure, à l'aide du logiciel ALIZÉ [5], a permis d'évaluer la portance de l'arase qui s'élève à 30 MPa.

8.1.3 - Les hypothèses de dimensionnement

Le maître d'ouvrage retient pour son projet les hypothèses suivantes :

- Trafic : T4 ou 40 PL / j / sens
- Portance du support : 30 MPa.
- Progression annuelle du trafic : 2 % (1 →10 ans) et 3 % (11 →20 ans)
- Durée de vie de dimensionnement : 20 ans

8.1.4 - Solution d'entretien avec le retraitement en place au liant hydraulique

Compte tenu du fait que le trafic prévu est inférieur à T3 (150 PL/j/sens), le guide technique [1] autoriserait à ne pas effectuer une étude de dimensionnement. Néanmoins, compte tenu du niveau de portance de l'arase de 30 MPa (inférieur au seuil de 50 MPa fixé par le guide dans ses fiches), une approche dimensionnelle suivant la méthodologie ALIZÉ sera appliquée.

8.1.4.1 - La caractérisation des matériaux en place

Les matériaux prélevés dans la structure existante ont présenté les caractéristiques suivantes :

- Une teneur en eau de 5%, légèrement inférieure à celle de l'Optimum Proctor Modifié (OPM de 8,5%) – Il s'agit d'un matériau constitué de 60% de grave silteuse, 15 % d'agrégats d'enrobés et 25 % de limon A1
- Une courbe granulométrique située à l'extérieur du fuseau de la norme NF EN 13285,
- Une valeur au bleu de méthylène $V_{BS} = 0,6$ (<0,8 fixée par le guide).

Conformément au guide technique [1], les matériaux prélevés dans la chaussée existante présentent une qualité M2.

8.1.4.2 - Le dosage en liant

En l'absence d'étude de formulation et compte tenu des retours d'expériences sur des matériaux de ce type, le dosage en liant est fixé à 4 % et le choix s'est porté sur un liant hydraulique routier à base de laitier (70 %) et de clinker (30 %).

8.1.4.3 - Le choix du niveau de qualité du retraitement

Pour un trafic T4, un matériau prélevé de qualité M2 et un retraitement destiné à constituer la couche de base de la future chaussée, le choix du maître d'œuvre se

porte donc pour un niveau de qualité de retraitement R1. Le guide technique [1] précise alors que la qualité du compactage q_2 est admise (cf tableau 12 page 75). Pour assurer cette performance de compactage, le niveau de portance de l'arase devra être au minimum de 30 MPa.

8.1.4.4 - Les paramètres de calcul de dimensionnement

Pour un niveau de qualité de retraitement R1, pour un matériau en place de qualité M2 et pour des matériaux comprenant environ 15 % de matériaux bitumineux, les tableaux 21 et 22 (pages 90 et 91) donnent les valeurs indicatives des paramètres de calcul de dimensionnement :

- Module du matériau retraité $E = 18\,000$ MPa
- Contrainte à 10^6 cycles du matériau retraité : $\sigma_6 = 0,55$
- Pente de la courbe de fatigue : $-1/b = 16$
- Dispersion sur les résultats en fatigue : $S_N = 1,5$
- Dispersion sur l'épaisseur (pas de reprofilage avant retraitement): $Sh = 4$

8.1.4.5 - Le dimensionnement de la structure retraitée

A partir des hypothèses définies au paragraphe 8.1.3, des données propres à la technique de retraitement fournies dans le paragraphe 8.1.4 et du fait que le retraitement concerne la totalité de l'épaisseur de l'ancienne chaussée (aucune partie conservée de l'ancienne chaussée), le guide technique [1] et le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussée » [4] donnent les éléments suivants :

- Coefficient d'Agressivité Moyen : $CAM = 0,5$
- Risque : $r = 12,5$
- Coefficient de calage : $kd = 1,5$

La portance du support étant de 30 MPa, il n'est pas possible d'utiliser les fiches de structures pour déterminer l'épaisseur de la structure retraitée. Dans ce cas, le logiciel ALIZÉ [5] est nécessaire pour déterminer l'épaisseur du matériau retraité qui s'élève alors, pour le projet étudié, à 38 cm.

8.1.4.6 - Méthodologie de reprise

La méthodologie de retraitement est fixée comme suit :

- Fraisage du corps de chaussée en matériaux bitumineux.
- Réglage à la niveleuse des agrégats d'enrobés.
- Epanchage de liant hydraulique (dosage de 4 %) et malaxage de la chaussée en place sur une épaisseur totale de 38 cm.

- Mise en œuvre d'une couche de cure + cloutage + gravillonnage
- Mise en œuvre d'un enrobé bitumineux sur 4 cm d'épaisseur.

8.1.4.7 - Modélisation de la structure retraitée

La structure réalisée est modélisée en considérant les hypothèses fournies par le tableau 28.

Tableau 28 - Caractéristiques mécaniques retenues pour les matériaux et le sol support				
Epaisseur (cm)	Matériaux	Module		
4	BBSG	5.400	MPa	Module 15°C, 10Hz
38	Matériaux traités en place (qualité M2)	18 000	MPa	Module
-	Sol	30	MPa	Module EV2

8.1.4.8 - Hypothèses d'interface

Les conditions d'interface prises pour ce dimensionnement sont :

- interface BBSG / matériau retraité considérée comme semi-collée ;
- interface matériau traité / sol d'arase considérée comme collée.

8.1.4.9 - Vérification du dimensionnement

La vérification du dimensionnement est faite à l'aide du logiciel ALIZÉ. Les contraintes tangentielles à la base du matériau retraité et les déformations verticales dans le sol support ont été calculées et synthétisées dans le tableau 29.

Tableau 29 - Récapitulatif des contraintes et déformations calculées					
			Alizé	Admissible	U
σ	T	MTLH	0.605	0.615	MPa
ε	Z	SOL	108	2220	μ Def

Du fait que ces contraintes et déformations calculées sont inférieures aux valeurs admissibles, on est en mesure d'affirmer que la solution de retraitement envisagée répond parfaitement aux hypothèses fixées par le maître d'ouvrage.

8.1.5. Solution de reconstruction en matériaux bitumineux

8.1.5.1 - Méthodologie de reprise

- Fraisage du corps de chaussée en matériaux bitumineux sur 5 cm et évacuation des agrégats d'enrobés AE en centrale d'enrobés
- Fraisage de la couche de base sur l'épaisseur qui sera déterminée par le dimensionnement
- Mise en œuvre d'une couche de cure + cloutage + gravillonnage sur la GNT restante
- Mise en œuvre de la GB de base
- Mise en œuvre d'un enrobé bitumineux sur 5 cm d'épaisseur.

8.1.5.2 - Résultats du dimensionnement

La structure réalisée est modélisée en considérant les hypothèses fournies par le tableau 30.

Tableau 30 - Caractéristiques mécaniques retenues pour les matériaux et le sol support

Epaisseur (cm)	Matériaux	Module		
5	BBSG	5.400	MPa	Module 15°C, 10Hz
12	Grave bitume GB3	9 300	MPa	Module 15°C, 10Hz
13	Couche de forme existante (PF2) en GNT	50	MPa	Module EV2

La vérification du dimensionnement est faite à l'aide du logiciel ALIZÉ. L'allongement à la base de la couche de grave bitume et les déformations verticales dans le sol support sont inférieures aux valeurs admissibles.

Les deux solutions proposées en retraitement et en reconstruction conviennent sur le plan technique pour l'entretien structurel de la chaussée. Le tableau 31 récapitule l'ensemble des données de dimensionnement pour les deux solutions envisagées.

Le maître d'ouvrage choisira donc la solution en fonction des résultats de l'analyse économique et environnementale qui sera traitée en 8.4 - Choix de la solution d'entretien.

Tableau 31 - Récapitulatif de la démarche de dimensionnement et d'évaluation de la résistance au gel/dégel des deux solutions d'entretien envisagées dans le projet N°1

La structure en place	Structure	5 cm Béton Bitumineux BB /25 cm Grave Non Traitée GNT /Sol
	Caractéristiques mécaniques	Déflexion moyenne : 200/100 mm
	Indice de gel - logiciel Gel 1D [9]	91 °C.jour
Hypothèses de dimensionnement	Trafic	T4 = 35 PL/j
	Portance du sol support	30 MPa
	Taux de croissance annuel du trafic	2% (jusqu'à 10 ans) puis 3%
	Période de service	20 ans
Retraitement de la chaussée en place à froid aux liants hydrauliques	Caractéristiques des matériaux de la chaussée existante	Courbe granulométrique à l'extérieur du fuseau de la norme NF EN 13285
		Valeur au bleu de méthylène VBS=0.6 (< 0.8)
		Matériau ~ Qualité M 2
	Dosage en liant	4% LHR (70% laitier + 30% clinker)
	Qualité de retraitement	Niveau R 1 - Qualité de compactage q2
	Paramètres de calcul de dimensionnement conformément au guide « Retraitement en place des anciennes chaussées » [1]	Module du matériau retraité E = 18 000 MPa
		Contrainte à 10 ⁶ cycles $\sigma_6 = 0.55$
		Pente de la courbe de Fatigue (-1/b) = 16
		Dispersion sur les résultats en Fatigue $S_N = 1.5$
		Dispersion sur l'épaisseur Sh = 4
	Dimensionnement de la structure retraitée conformément au guide [1]	Coefficient d'agressivité moyen CAM = 0.5
		Risque r = 12.5%
		Coefficient de calage kd = 1.5
	Methodologie de retraitement	Fraisage de la couche en matériaux bitumineux
		Réglage à la niveleuse des agrégats d'enrobés
Epannage du liant hydraulique (4%) et malaxage en place sur une épaisseur de 38 cm		
Réalisation d'une couche de cure, cloutage et gravillonnage		
Mise en œuvre enrobe bitumineux d'épaisseur 4 cm		
Modélisation de la structure retraitée	Paramètres du guide [1]	
Vérification du dimensionnement à l'aide du logiciel ALIZÉ [5]	Contrainte à la base de la couche retraitée et déformation verticale dans le sol	
Reconstruction en matériaux bitumineux	Modélisation de la structure avec le guide technique "Conception et dimensionnement des structures de chaussées [4]	Fraisage de la structure en place sur 17 cm
		Mise en œuvre d'une couche de cure, cloutage et gravillonnage sur la GNT restante
		Mise en œuvre Grave Bitume GB3 sur 12 cm Puis mise en œuvre enrobé bitumineux semi-grenu BBSG sur 5 cm
	Vérification du dimensionnement à l'aide du logiciel ALIZÉ [5]	Allongement à la base de la Grave Bitume et déformation verticale dans le sol support

8.2 - Deuxième projet

Une commune rurale, d'environ 500 habitants, dispose sur son territoire d'une carrière produisant annuellement cent mille tonnes de granulats. Le développement constant de cette activité contribue certes au dynamisme de l'économie locale, mais il entraîne aussi une importante circulation de poids lourds sur la route communale traversant la commune. Ceci a généré une dégradation de la structure routière dont l'état est devenu inacceptable pour les usagers à cause de l'inconfort et de l'insécurité. La réfection de la route de 2 km de longueur et de 5,00 m de largeur s'imposait donc. En outre, compte tenu de l'activité continue de la carrière sur toute l'année, il a été décidé de saisir l'opportunité de réhabiliter la route pour améliorer sa tenue au gel/dégel. On se propose donc, en suivant la démarche indiquée au chapitre 7 du présent guide, de déterminer le dimensionnement mécanique de la chaussée à retraiter.

8.2.1 - Évaluation du trafic cumulé « TC »

On recherche d'abord le trafic à la mise en service « t », puis le trafic cumulé « TC ».

8.2.1.1 - Trafic à la mise en service « t »

Les comptages réalisés sur la route communale traversant la commune donnent une estimation du nombre de poids lourds d'un poids total autorisé en charge supérieur à 3,5 t qui circulent sur l'actuelle route. Ces comptages ont été effectués durant le mois de mars pendant quinze jours consécutifs, sur un sens de circulation, donnant un chiffre de 12 poids lourds par jour et par sens.

8.2.1.2 - Trafic moyen journalier annuel (MJA) à la mise en service

Il s'agit d'apporter ici les corrections au trafic obtenu par comptage. On estime que pendant les mois de décembre, janvier et février, le trafic lourd diminue de 50 % par rapport à celui de mars pris pour référence. Par ailleurs, le transport lié à l'activité du BTP, qui augmente sur la période allant du mois d'avril à octobre, engendre durant cette période un trafic poids lourds 25 % supérieur à celui du mois de mars. En outre, le trafic durant le mois de novembre est considéré équivalent à celui de mars. Le trafic moyen journalier annuel (MJA) de l'année de comptage est alors :

$$\text{MJA} = 12 \text{ PL} (2 \text{ mois} \times 1 + 7 \text{ mois} \times 1,25 + 3 \text{ mois} \times 0,50) \times 30/365$$

$$\text{MJA} = 12,08 \text{ PL/j/sens}$$

D'où MJA = 12,08 PL/j/sens.

On prévoit que la remise en service de la route aura lieu au printemps de l'année suivant celle du comptage. On estime, d'autre part, que la croissance du trafic liée à l'activité économique est de 0 % par an. Le trafic MJA à la mise en service sera donc :

$$MJA = 12,08 \times 1$$

$$MJA = 12,08 \text{ PL/j/sens}$$

$$\text{Soit } MJA = 13 \text{ PL/j/sens.}$$

8.2.1.3 - Trafic « t » à la mise en service

L'expression du trafic à la mise en service est :

$$t = MJA \times R$$

où R est un coefficient de pondération lié à la largeur utile de la route. Il prend en compte le recouvrement des bandes de roulement dans le cas des chaussées bidirectionnelles à largeur réduite. Or, dans le présent projet, la chaussée est bidirectionnelle et sa largeur est égale à 5,00 m. Il y a donc recouvrement des bandes de roulement, et par suite: $R = 1,5$

$$\text{D'où: } t = 1,5 \text{ MJA}$$

$$t = 19,5 \text{ PL/j/sens ; soit } 20 \text{ PL/j/sens}$$

8.2.1.4 - Détermination du trafic cumulé « TC »

L'expression du trafic cumulé s'écrit :

$$TC = 365 \times t \times C$$

où t est le trafic journalier à la mise en service

et C est le facteur de cumul développé et qui s'exprime par :

$$C = [(1 + r) n - 1] / r$$

En ce qui concerne la période de service, on a retenu pour ce projet une durée de 20 ans.

En matière de taux annuel de croissance du trafic, on a retenu l'hypothèse d'un taux de 2% pendant les 20 années.

En appliquant l'expression du facteur de cumul « C », on obtient :

$$C = [(1 + 0,02)20 - 1] / 0,02$$

$$C = 24,30$$

Le trafic cumulé sur 20 ans est alors :

$$TC = 365 \times t \times C$$

$$TC = 365 \times 20 \times 24,30$$

$$\text{Soit : } 177 \text{ 390 PL/sens}$$

Avec PL, poids lourd de poids total autorisé en charge supérieur à 3,5 t.

Le trafic cumulé peut aussi être exprimé en nombre d'essieux standards :

$$NE = TC (PL) \times CAM$$

Pour les structures retraitées et pour des routes dont le trafic est T5 (compris entre 0 et 25 PL/j), le CAM est égal à 0,4. D'où:

$$NE = 177\,390 \times 0,4$$

$$NE = 70\,956 \text{ Essieux Standards.}$$

8.2.2 - La structure de chaussée en place

8.2.2.1 - La constitution de la structure existante

Les sondages ont montré que la structure de chaussée en place est constituée de :

- Une couche de surface constituée d'un enduit superficiel,
- Une couche de base en Grave Non Traitée GNT, d'épaisseur 30 cm,
- Une arase de classe AR2.

8.2.2.2 - Les caractéristiques de la structure existante

Les caractéristiques mécaniques de la chaussée en place sont :

- Déflexion moyenne mesurée sur site : $\sim 150 / 100^{\text{ième}}$ mm
- Déflexion caractéristique : $400 / 100^{\text{ième}}$ mm,
(Rappel : $D_{\text{caract}} = D_{\text{moy}} + 2 \times \text{écart type}$).

Ce niveau de déflexion caractérise une chaussée souple. Une modélisation à rebours de cette structure, à l'aide du logiciel ALIZÉ [5], a permis d'évaluer la portance de l'arase qui s'élève à 50 MPa.

8.2.2.3 - L'indice de gel admissible de la structure existante

L'indice de gel admissible de la structure existante est calculé selon la méthode exposée au paragraphe 7.4.

Tableau 32 - Caractéristiques thermiques des matériaux

Matériaux	ρ (kg/m ³)	W (%)	λ_{ng} (w/m°C)	λ_g (w/m°C)
Béton bitumineux	2 350	1	2,0	2,1
Grave Non Traitée GNT	2 200	4	1,80	2,0
Sol	1 300	32	1,10	1,80

- L'essai de cryosuccion selon la norme NF P 98-234-2 sur le limon A1 de l'arase donne une valeur de pente de : $p = 1,0 \text{ mm} / (^\circ\text{C}\cdot\text{heure})^{1/2}$ {La valeur de pente de la courbe de gonflement détermine la classe de sensibilité au gel}.

- Caractéristiques thermiques des matériaux

- Le sol limoneux est classé très gélif (pente de gonflement de 1,0). La couche de GNT est non gélive.

- La quantité de gel admissible Q_g en surface des couches gélives donne :

$$Q_g = 1/p = 1 (^\circ\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$$

- La protection thermique Q_{ng} apportée par la couche de forme est :

$$Q_{ng} = 2.1 (^\circ\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$$

- La structure de chaussée présentant une épaisseur de matériaux liés inférieure à 20 cm, la plate-forme support n'est pas apte à recevoir mécaniquement une certaine quantité de gel :

$$Q_m = 0 (^\circ\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$$

- Détermination de la quantité de gel admissible au niveau de la plateforme Q_{pf} :

$$Q_{pf} = Q_g + Q_{ng} + Q_m$$

$$Q_{pf} = 1 + 2.1 = 3.1 (^\circ\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$$

- Calcul thermique détaillé

Le programme GELID permet alors de calculer l'indice de gel admissible de la structure : $IA (^\circ\text{C}\cdot\text{jour}) = 91$

8.2.3 - Les hypothèses de dimensionnement

Le maître d'ouvrage retient pour son projet les hypothèses suivantes :

- Trafic : T5 ou 20 PL / j / sens
- Portance du support : 50 MPa.
- Progression annuelle du trafic : 2 %
- Durée de vie de dimensionnement : 20 ans

8.2.4 - Solution d'entretien avec le retraitement en place au liant hydraulique

Compte tenu du fait que le trafic prévu est inférieur à T3 (150 PL/J/sens), le guide technique [1] LCPC SETRA autoriserait à ne pas effectuer une étude de dimensionnement. Néanmoins, compte tenu du niveau de portance de l'arase de 50 MPa (égal au seuil de 50 MPa fixé par le Guide dans ses fiches), une approche dimensionnelle suivant la méthodologie ALIZÉ est retenue.

8.2.4.1 - La caractérisation des matériaux en place

Les matériaux prélevés dans la structure existante ont présenté les caractéristiques suivantes :

- Une teneur en eau de 5%, légèrement inférieure à celle de l'Optimum Proctor Modifié (OPM de 8.5%) – Il s'agit d'un matériau constitué de 97 % de grave silteuse et 3 % d'enduit superficiel.
- Une courbe granulométrique située à l'intérieur du fuseau de la norme NF EN 13285,
- Une valeur au bleu de méthylène « V_{BS} », mesurée conformément à la norme sur le mélange précédemment cité de 0.6 donc inférieure à 0,8.

Conformément au guide technique [1], les matériaux prélevés dans la chaussée existante présentent une qualité M1.

8.2.4.2 - Le dosage en liant

En l'absence d'étude de formulation et compte tenu des retours d'expériences sur des matériaux de ce type, le dosage en liant est fixé à 4 % d'un liant hydraulique routier à base de laitier (70 %) et de clinker (30 %).

8.2.4.3 - Le choix du niveau de qualité du retraitement

Pour un trafic T5, un matériau prélevé de qualité M1 et un retraitement destiné visant à constituer la couche de base de la future chaussée, le choix du maître d'œuvre se porte donc pour un niveau de qualité de retraitement R1. Le guide technique [1] précise alors que la qualité du compactage q_2 est admise. Pour assurer cette performance de compactage, le niveau de portance de l'arase devra être au minimum de 30 MPa. Ce qui est le cas puisque la portance du support a été évaluée à 50 MPa.

8.2.4.4 - Les paramètres de calcul de dimensionnement

Pour un niveau de qualité de retraitement R1, pour un matériau en place de qualité M1 et pour des matériaux comprenant environ 3 % de matériaux bitumineux, le guide [1] donne les valeurs indicatives des paramètres de calcul de dimensionnement :

- Module du matériau retraité $E = 20\ 000$ MPa
- Contrainte à 10^6 cycles du matériau retraité : $\sigma_6 = 0,70$
- Pente de la courbe de fatigue : $-1/b = 16$
- Dispersion sur les résultats en fatigue : $S_N = 1$
- Dispersion sur l'épaisseur (pas de reprofilage avant retraitement): $Sh = 4$

8.2.4.5 - Le dimensionnement de la structure retraitée

A partir des hypothèses définies au paragraphe 8.1.3, des données propres à la technique de retraitement fournies dans le paragraphe 8.1.4 et du fait que le retraitement concerne la totalité de l'épaisseur de l'ancienne chaussée (aucune partie conservée de l'ancienne chaussée), le guide technique [1] et le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussée » [4] donnent les éléments suivants :

- Coefficient d'Aggressivité Moyen : CAM = 0,4
- Risque : r = 12,5
- Coefficient de calage : kd = 1,5

La fiche (R1 ; M1) fournie par le guide CFTR [1] permet alors de déterminer l'épaisseur du matériau retraité qui s'élève à 29 cm, recouvert d'une couche de surface de 4 cm de Béton Bitumineux.

8.2.4.6 - Méthodologie de reprise

La méthodologie de retraitement est fixée comme suit :

- Fraisage du corps de chaussée en matériaux bitumineux.
- Réglage à la niveleuse des agrégats d'enrobés.
- Epanchage de liant hydraulique (dosage de 4 %) et malaxage de la chaussée en place (RAP+GNT+SOL) sur une épaisseur totale de 29 cm
- Mise en œuvre d'une couche de cure + cloutage + gravillonnage
- Mise en œuvre d'un enrobé bitumineux sur 4 cm d'épaisseur.

8.2.4.7 - Modélisation de la structure retraitée

La structure réalisée est modélisée en considérant les hypothèses fournies par le tableau 33.

Tableau 33 - Caractéristiques mécaniques retenues pour les matériaux et le sol support

Epaisseur (cm)	Matériaux	Module		
4	BBSG	5 400	MPa	Module 15°C, 10Hz
29 cm	Matériaux traités en place (qualité M2)	18 000	MPa	Module
-	Sol	50	MPa	Module EV2

8.2.4.8 - Hypothèses d'interface

Les conditions d'interface prises pour ce dimensionnement sont :

- interface BBSG / matériau retraité considérée comme semi-collée ;
- interface matériau traité / sol d'arase considérée comme collée.

8.2.4.9 - Vérification du dimensionnement

La vérification du dimensionnement est faite à l'aide du logiciel ALIZÉ. Les contraintes tangentielles à la base du matériau retraité et les déformations verticales dans le sol support ont été calculées et synthétisées dans le tableau 34.

Tableau 34 - Récapitulatif des contraintes et déformations calculées					
			Alizé	Admissible	U
σ	T	MTLH	0.605	0.615	MPa
ε	Z	SOL	108	2220	μDef

8.2.4.10 - Dimensionnement au gel de la structure retraitée en place

Les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés dans la structure retraitée sont données dans le tableau 35.

Tableau 35 - Caractéristiques thermiques des matériaux				
Matériaux	ρ (kg/m ³)	W (%)	λ_{ng} (w/m°C)	λ_g (w/m°C)
Béton bitumineux	2,35	1	2,0	2,1
Chaussée Traitée	2.25	3	1.8	1.9
Sol	1,3	32	1,10	1,80

- Le sol limoneux est classé très gélif (pente de gonflement de 1,0).

Le programme GELID permet alors de calculer l'indice de gel admissible de la structure IA = 116 (°C.jour)

Du fait que les contraintes et déformations calculées sont inférieures aux valeurs admissibles, et du fait que l'indice de gel admissible est plus élevé que celui de la

chaussées existante, on est en mesure d'affirmer que la solution de retraitement envisagée répond parfaitement aux hypothèses fixées par le maître d'ouvrage.

8.2.5 - Solution de reconstruction en matériaux bitumineux

8.2.5.1 - Méthodologie de reprise

- Fraisage du corps de chaussée en matériaux bitumineux sur 17 cm et évacuation des AE en centrale d'enrobés
- Mise en œuvre d'une couche de cure + cloutage + gravillonnage sur la GNT restante
- Mise en œuvre de la couche de base en GB
- Mise en œuvre d'un enrobé bitumineux sur 5 cm d'épaisseur.

8.2.5.2 - Résultats du dimensionnement

Tableau 36 - Caractéristiques mécaniques retenues pour les matériaux et le sol support				
Epaisseur (cm)	Matériaux	Module		
5	BBSG	5.400	MPa	Module 15°C, 10Hz
12	Grave bitume c13	9 300	MPa	Module 15°C, 10Hz
13	Couche de forme existante (PF2) en GNT	50	MPa	Module EV2

8.2.5.3 - Dimensionnement au gel de la structure bitumineuse

- Caractéristiques thermiques des matériaux

Tableau 37 - Caractéristiques thermiques des matériaux				
Matériaux	ρ (kg/m ³)	W (%)	λ_{ng} (w/m°C)	λ_g (w/m°C)
BB	2,35	1	2,0	2,1
GB	2.35	1	1.9	1.9
GNT	2,10	4	1,80	2,0
Sol	1,3	32	1,10	1,80

• Calcul thermique détaillé

Le programme GEL1D permet alors de calculer l'indice de gel admissible :
 $IA (^{\circ}C.jour) = 69$

En conclusion, la structure bitumineuse a été vérifiée à l'aide du logiciel ALIZÉ.

Les deux solutions proposées en retraitement et en reconstruction conviennent sur le plan mécanique pour l'entretien structurel de la chaussée. En revanche, la reconstruction induit une perte de protection au gel par rapport à l'ancienne structure à cause de la réduction de l'épaisseur de la couche de forme.

Le tableau 38 récapitule l'ensemble des données de dimensionnement pour les deux solutions envisagées.

Le maître d'ouvrage choisira donc la solution en fonction des résultats de l'analyse économique et environnementale qui sera traitée en 8.4 - Choix de la solution d'entretien.

Tableau 38 - Récapitulatif de la démarche de dimensionnement et d'évaluation de la résistance au gel/dégel des deux solutions d'entretien envisagées dans le projet N°2

La structure en place	Structure	Enduit superficiel /30 cm Grave Non Traitée GNT /Sol classe AR2
	Caractéristiques mécaniques	Déflexion moyenne : 150/100 mm
	Indice de gel - logiciel GEL1D [9]	91 °C.jour
Hypothèses de dimensionnement	Trafic	T5 = 19 PL/j
	Portance du sol support	50 MPa
	Taux de croissance annuel du trafic	2%
	Période de service	20 ans
Retraitement de la chaussée en place à froid aux liants hydrauliques	Caractéristiques des matériaux de la chaussée existante	Courbe granulométrique à l'intérieur du fuseau de la norme NF EN 13285
		Valeur au bleu de méthylène VBS=0.6 (< 0.8)
		Matériau ~ Qualité M 1
	Dosage en liant	4% LHR (70% laitier + 30% clinker)
	Qualité de retraitement	Niveau R 1 - Qualité de compactage q2
	Paramètres de calcul de dimensionnement conformément au guide « Retraitement en place des anciennes chaussées » [1]	Module du matériau retraité E = 20 000 MPa
		Contrainte à 10 ⁶ cycles $\sigma_6 = 0.70$
		Pente de la courbe de Fatigue (-1/b) = 16
		Dispersion sur les résultats en Fatigue $S_N = 1$
		Dispersion sur l'épaisseur Sh = 4
	Dimensionnement de la structure retraitée conformément au guide [1]	Coefficient d'agressivité moyen CAM = 0.4
		Risque r = 12.5%
		Coefficient de calage kd = 1.5
Methodologie de retraitement	Fraisage de la couche en matériaux bitumineux	
	Réglage à la niveleuse des agrégats d'enrobés	
	Epannage du liant hydraulique (4%) et malaxage en place sur une épaisseur de 38 cm	
	Réalisation d'une couche de cure, cloutage et gravillonnage	
	Mise en œuvre enrobé bitumineux d'épaisseur 4 cm	
Dimensionnement gel Logiciel GEL1D [9]	Indice de gel = 116°C.jour	
Reconstruction en matériaux bitumineux	Modélisation de la structure avec le guide technique "Conception et dimensionnement des structures de chaussées [4]	Fraisage de la structure en place sur 17 cm
		Mise en œuvre d'une couche de cure, cloutage et gravillonnage sur la GNT restante
		Mise en œuvre Grave Bitume GB3 sur 12 cm Puis mise en œuvre enrobé bitumineux semi-grenu BBSG sur 5 cm
	Vérification du dimensionnement à l'aide du logiciel ALIZÉ [5]	Allongement à la base de la Grave Bitume et déformation verticale dans le sol support
Dimensionnement gel logiciel GEL1D [9]	Indice de gel = 69 °C.day	

8.3 - Troisième projet

Un Conseil Général est confronté à une problématique de réhabilitation d'une chaussée à moyen trafic sur une Route Départementale qui lui a été rétrocédée. La chaussée présente des signes de dégradations structurelles des couches d'assises, de type fissurations de fatigue et début de faïençage. L'état de la chaussée est devenu inacceptable pour les usagers à cause de l'inconfort et de l'insécurité. La réfection de la route sur 7 km de longueur et de 8,00 m de largeur s'imposait donc. En outre, compte tenu de l'importance de cette route en tant qu'infrastructure d'échanges et de transport, il a été décidé de saisir l'opportunité de réhabiliter la route pour améliorer sa tenue au gel/dégel. On se propose donc, en suivant la démarche indiquée au chapitre 7 du présent guide, de déterminer le dimensionnement mécanique de la chaussée à retraiter.

8.3.1 - Évaluation du trafic cumulé « TC »

On recherche d'abord le trafic à la mise en service « t », puis le trafic cumulé « TC ».

8.3.1.1 - Trafic à la mise en service « t »

Les comptages réalisés sur la Route Départementale donnent une estimation du nombre de poids lourds d'un poids total autorisé en charge supérieur à 3,5 t qui circulent sur l'actuelle route. Ces comptages ont été effectués durant le mois de mars pendant quinze jours consécutifs, sur un sens de circulation, donnant un chiffre de 220 poids lourds par jour et par sens.

8.3.1.2 - Trafic moyen journalier annuel (MJA) à la mise en service

Il s'agit d'apporter ici les corrections au trafic obtenu par comptage. On estime que pendant les mois de décembre, janvier et février, le trafic lourd diminue de 25 % par rapport à celui de mars pris pour référence. Par ailleurs, le transport lié à l'activité économique, qui augmente sur la période allant du mois d'avril à octobre, engendre durant cette période un trafic poids lourds 30 % supérieur à celui du mois de mars. En outre, le trafic durant le mois de novembre est considéré équivalent à celui de mars. Le trafic moyen journalier annuel (MJA) de l'année de comptage est alors :

$$\text{MJA} = 220 \text{ PL} (2 \text{ mois} \times 1 + 7 \text{ mois} \times 1,30 + 3 \text{ mois} \times 0,75) \times 30/365$$

$$\text{MJA} = 241,40 \text{ PL/j/sens}$$

D'où MJA = 241,40 PL/j/sens.

$$\text{Soit MJA} = 242 \text{ PL/j/sens}$$

On prévoit que la remise en service de la route aura lieu au printemps de l'année suivant celle du comptage. On estime, d'autre part, que la croissance du trafic liée à l'activité économique est de 2 % par an. Le trafic MJA à la mise en service sera donc :

$$MJA = 242 \times 1,02$$

$$MJA = 246,84 \text{ PL/j/sens}$$

$$\text{Soit } MJA = 247 \text{ PL/j/sens.}$$

8.3.1.3 - Trafic « t » à la mise en service

L'expression du trafic à la mise en service est :

$$t = MJA \times R$$

où R est un coefficient de pondération lié à la largeur utile de la route. Il prend en compte le recouvrement des bandes de roulement dans le cas des chaussées bidirectionnelles à largeur réduite. Or, dans le présent projet, la chaussée est bidirectionnelle et sa largeur est égale à 8,00 m. Il n'y a donc pas recouvrement des bandes de roulement, et par suite: $R = 1$

$$\text{D'où: } t = 1 \text{ MJA}$$

$$t = 247 \text{ PL/j/sens}$$

8.3.1.4 - Détermination du trafic cumulé « TC »

L'expression du trafic cumulé s'écrit :

$$TC = 365 \times t \times C$$

où t est le trafic journalier à la mise en service

et C est le facteur de cumul développé et qui s'exprime par :

$$C = [(1 + r)^n - 1] / r$$

En ce qui concerne la période de service, on a retenu pour ce projet une durée de 20 ans.

En matière de taux annuel de croissance du trafic, on a retenu l'hypothèse d'un taux de 2% pendant les 20 années.

En appliquant l'expression du facteur de cumul « C », on obtient :

$$C = [(1 + 0,02)^{20} - 1] / 0,02$$

$$C = 24,30$$

Le trafic cumulé sur 20 ans est alors :

$$TC = 365 \times t \times C$$

$$TC = 365 \times 247 \times 24,30$$

$$\text{Soit : } 2 \text{ 190 767 PL/sens}$$

Avec PL, poids lourd de poids total autorisé en charge supérieur à 3,5 t.

Le trafic cumulé peut aussi être exprimé en nombre d'essieux standards :

$$NE = TC (PL) \times CAM$$

Pour les structures retraitées et pour des routes dont le trafic est T2 (compris entre 150 et 300 PL/j), le CAM est égal à 1. D'où:

$$NE = 2\,190\,767 \times 1$$

$$NE = 2\,190\,767 \text{ Essieux Standards.}$$

8.3.2 - La structure de chaussée en place

8.3.2.1 - La constitution de la structure existante

Les sondages ont montré que la structure de chaussée en place est constituée de :

- Une couche de surface en béton bitumineux mince en granularité 0/10 sur une épaisseur de 4 cm,
- Une couche de base en Grave Bitume en granularité 0/14 sur une épaisseur de 10 cm,
- Une couche de fondation en Grave Traitée au liant hydraulique sur une épaisseur de 25 cm,
- Une couche de forme en GNT sur une épaisseur de plus de 80 cm,
- Une arase en sol naturel constitué de limon A1.

8.3.2.2 - Les caractéristiques de la structure existante

Des essais de déflexions, conduits à l'aide d'un deflectographe à grand rendement de type Lacroix, ont donné les résultats suivants :

- Déflexion moyenne mesurée sur site : $\sim 17/100^{\text{ième}}$ mm
- Déflexion caractéristique : $65 / 100^{\text{ième}}$ mm,
(Rappel : $D_{\text{caract}} = D_{\text{moy}} + 2 \times \text{écart type}$)

Ce niveau de déflexion caractérise une chaussée de type semi rigide. Une modélisation à rebours de cette structure, à l'aide du logiciel ALIZÉ [5], a permis d'évaluer la portance de la couche de forme en GNT à 120 Mpa soit une PF3.

On peut alors déterminer l'indice de gel admissible de la structure existante car compte tenu du niveau de trafic prévisible, celui-ci devra être maintenu pour des structures de réhabilitation de la chaussée.

8.3.2.3 - L'indice de gel admissible de la structure existante

L'indice de gel admissible de la structure existante est calculé selon la méthode exposée au paragraphe 7.4.

- L'essai de cryosuccion selon la norme NF P 98-234-2 sur le limon A1 de l'arase donne une valeur de pente de : $p = 1,0 \text{ mm} / (^\circ\text{C}\times\text{heure})^{1/2}$ {La valeur de pente de la courbe de gonflement détermine la classe de sensibilité au gel}.
- Caractéristiques thermiques des matériaux

Tableau 39 - Caractéristiques thermiques des matériaux				
Matériaux	ρ (kg/m^3)	W (%)	λ_{ng} ($\text{w}/\text{m}^\circ\text{C}$)	λ_g ($\text{w}/\text{m}^\circ\text{C}$)
BB	2,35	1	2,0	2,1
GTLH	2,35	3	1,80	1,90
GNT	2,10	4	1,80	2,0
Sol	1,3	32	1,10	1,80

- Le sol limoneux est classé très gélif (pente de gonflement de 1,0). La couche forme en GNT est non gélive.

- La quantité de gel admissible Q_g en surface des couches gélives donne :

$$Q_g = 1/p = 1 (^\circ\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$$

- La protection thermique Q_{ng} apportée par la couche de forme est :

$$Q_{ng} = \frac{AnHn^2}{(Hn + 10)}$$

Avec Hn = épaisseur de couche de forme moins gélive.

An = coefficient dépendant de la nature du matériau de couche

- De nature, matériaux silteux, les granulats de la couche de forme sont de catégorie « D ».

- La protection thermique Q_{ng} apportée par la couche de forme est :

$$Q_{ng} = 8.5 (^\circ\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$$

Dans ce cas particulier, les épaisseurs de structure de chaussées en matériaux liés sont au total supérieures à 20 cm. Elles comprennent en effet, 14 cm d'enrobés et 25 cm de grave traitée au liant hydraulique. On peut donc admettre une pénétration au gel dans les couches gélives de l'arase en limitant l'accroissement des sollicitations qui en résulte durant les périodes de gel.

On détermine alors une qualité au gel Q_M supplémentaire pour la structure de chaussée.

La vérification de comportement mécanique de la structure de chaussée durant la période de dégel, dans la limite de 5 % au maximum d'augmentation des

contraintes à la base de la couche de fondation en Grave ciment, est définie suivant les hypothèses suivantes :

- Le module de la couche de forme en matériaux silteux lors de la phase de dégel est divisé par 10.
- Les interfaces entre BB et GB et entre GB et GTLH ainsi que les interfaces entre la partie couche de forme gelée et couche de forme dégelée sont considérées collées.
- On détermine alors, par itération, l'épaisseur « e » de sol dégelé conduisant à des contraintes supérieures de 5 % à la base de la GTLH de fondation.
- L'épaisseur « e » est alors transcrite en quantité de gel \sqrt{I} par la relation :

$$\sqrt{I} = \frac{e}{10} \text{ soit } Q_m = 0,4$$

- La quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme Q_{pf} est alors :
 $Q_{pf} = Q_g + Q_{ng} + Q_m$

$$Q_{pf} = 9,9 \text{ (}^\circ\text{C.jour)}^{1/2}$$

- Calcul thermique détaillé

Le programme GEL 1D permet alors de calculer l'indice de gel admissible de la structure :

$$IA(\text{}^\circ\text{C.jour}) = 414\text{ }^\circ\text{C.jour}$$

8.3.3 - Les hypothèses de dimensionnement

Les mesures de comptage, réalisées ainsi que le projet d'aménagement d'une zone industrielle desservie par cette Route Départementale, conduisent le maître d'ouvrage à retenir pour le projet d'aménagement les hypothèses suivantes :

- Trafic T2 de 250 poids lourds par jour et par sens,
- Durée de vie de dimensionnement – 20 ans,
- Progression de trafic de 2 % par an,
- CAM de 1,0 conforme aux comptages pour les Voies du Réseau Structurant VRS, la zone industrielle proche de la Route Départementale risquant de générer un important trafic de poids lourds fortement chargés,
- Portance du support : 120 MPa.

8.3.4 - Solution d'entretien avec le retraitement en place au liant hydraulique

Le trafic prévu étant supérieur à T3 (150 PL/J/sens), le guide technique [1] LCPC SETRA exige une étude de dimensionnement. On trouvera l'approche dimensionnelle suivant la méthodologie ALIZÉ ci-après.

Compte tenu de la qualité des matériaux de la chaussée, un traitement en place est envisagé suivant la méthodologie suivante :

- Fraisage du corps de chaussée sur une épaisseur de 39 cm. Une partie conséquente de la couche de fondation en GTLH en fin de vie est rabotée également.
- Le profil de la chaussée ne pouvant être modifié, 8 cm de matériau environ sont évacués en plate-forme de tri.
- Epanchage de liant hydraulique (dosage de 5 %) et malaxage de la chaussée en place (RAP+GNT+SOL) sur une épaisseur totale de 30 cm.
- Mise en œuvre d'une couche de cure + cloutage + gravillonnage
- Mise en œuvre d'un enrobé bitumineux à Module Elevé sur 8 cm d'épaisseur.

8.3.4.1. La caractérisation des matériaux en place

Les matériaux prélevés dans la structure existante ont présenté les caractéristiques suivantes :

- La courbe granulométrique du mélange de RAP et de GTLH fraisée est située à l'extérieur du fuseau de la norme NF EN 13285,
- Mais la valeur au bleu de méthylène VBS, mesurée sur le mélange, est inférieure à 0,8.

Conformément aux instructions du guide technique [1], les matériaux prélevés dans la chaussée existante présentent une qualité M2.

8.3.4.2 - Le dosage en liant

En l'absence d'étude de formulation et compte tenu des retours d'expériences sur des matériaux de ce type, le dosage en liant est fixé à 4 % d'un liant hydraulique routier à base de laitier (70 %) et de clinker (30 %).

8.3.4.3 - Le choix du niveau de qualité du retraitement

Pour un trafic T2, un matériau prélevé de qualité M2 et un retraitement destiné visant à constituer la couche de base de la future chaussée, le choix du maître d'œuvre se porte donc pour un niveau de qualité de retraitement R1. Le guide technique [1] précise alors que la qualité du compactage q1 est exigée. Pour assurer cette performance de compactage, le niveau de portance de l'arase devra être au minimum de 50 MPa. Ce qui est le cas puisque la portance du support a été évaluée à 120 MPa.

8.3.4.4 - Les paramètres de calcul de dimensionnement

Pour un niveau de qualité de retraitement R1, pour un matériau en place de qualité M2 et pour des matériaux comprenant environ 30 % de matériaux bitumineux, le guide [1] donne les valeurs indicatives des paramètres de calcul de dimensionnement :

- Module du matériau retraité $E = 18\ 000\ \text{MPa}$
- Contrainte à 10^6 cycles du matériau retraité : $\sigma_6 = 0,55$
- Pente de la courbe de fatigue : $-1/b = 16$
- Dispersion sur les résultats en fatigue : $S_N = 1,5$
- Dispersion sur l'épaisseur (pas de reprofilage avant retraitement): $Sh = 4$

8.3.4.5 - Le dimensionnement de la structure retraitée

A partir des hypothèses définies au paragraphe 8.1.3, des données propres à la technique de retraitement fournies dans le paragraphe 8.1.4 et du fait que le retraitement concerne la totalité de l'épaisseur de l'ancienne chaussée (aucune partie conservée de l'ancienne chaussée), le guide technique [1] et le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussée » [4] donnent les éléments suivants :

- Coefficient d'Agressivité Moyen : $CAM = 1,0$
- Risque : $r = 7,5$
- Coefficient de calage : $kd = 1,6$

8.3.4.6 - Méthodologie de reprise

Compte tenu de la qualité des matériaux de la chaussée, un traitement en place est envisagé suivant la méthodologie suivante :

- Fraisage du corps de chaussée sur une épaisseur de 39 cm.
- Le profil de la chaussée ne pouvant être modifié, 6 cm de matériau environ sont évacués en plate-forme de tri.
- Epanchage de liant hydraulique (dosage de 5 %) et malaxage de la chaussée en place (RAP+GNT+SOL) sur une épaisseur totale de 32 cm.
- Mise en œuvre d'une couche de cure + cloutage + gravillonnage
- Mise en œuvre d'un enrobé bitumineux à Module Elevé sur 6 cm d'épaisseur.

8.3.4.7. Modélisation de la structure retraitée

La structure peut être modélisée suivant les paramètres suivants :

Tableau 40 - Caractéristiques mécaniques retenues pour les matériaux et le sol support				
Epaisseur (cm)	Matériaux	Module		
6	BBME	12.000	MPa	Module 15°C, 10Hz
33	Matériaux traités en place (qualité M2)	18 000	MPa	Module
60	Couche de forme en GNT	500	MPa	Module
-	Sol	120	MPa	Module EV2

8.3.4.8 - Hypothèses d'interface

Les conditions d'interface prises pour ce dimensionnement sont :

- interface BBSG / matériau retraité considérée comme semi-collée ;
- interface matériau traité / sol d'arase considérée comme collée.

8.3.4.9 - Vérification du dimensionnement

La vérification du dimensionnement est faite à l'aide du logiciel ALIZÉ. Les contraintes tangentielles à la base du matériau retraité et les déformations verticales dans le sol support ont été calculées et synthétisées dans le tableau 41.

Tableau 41 - Récapitulatif des contraintes et déformations calculées					
			Alizé	Admissible	U
σ	T	Chaussée retraitée	0.563	0.645	MPa
ε	Z	SOL	83	514	μ Def

8.3.4.10 - Dimensionnement au gel de la structure retraitée en place

Les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés dans la structure retraitée sont données dans le tableau 39.

- Le sol limoneux est classé très gélif (pente de gonflement de 1,0).
- Le programme GEL 1D permet alors de calculer l'indice de gel admissible de la structure :

$$IA(^{\circ}\text{C.jour}) = 397^{\circ}\text{C.jour}$$

En conclusion, la structure retraitée a été vérifiée à l'aide du logiciel ALIZÉ.

En revanche, il y a une perte légère de protection au gel par rapport à l'ancienne structure à cause de la réduction de l'épaisseur de la couche de forme traitée.

8.3.5 - Solution de reconstruction en matériaux bitumineux

Dans l'hypothèse d'une impossibilité de rechargement de la chaussée, d'un nécessaire raccordement aux voies existantes et de l'impossibilité de modifier le profil en long, une solution de reprise en structure bitumineuse peut être étudiée.

La mise en œuvre d'une couche de base en matériaux bitumineux et d'une couche de roulement est réalisable après décaissement de la structure sur une épaisseur équivalente à celle prévue en enrobé.

Le décaissement de la structure sur 17 cm, permet à la nouvelle structure bitumineuse de s'appuyer sur la GTLH en fin de vie. Celle-ci constitue cependant une couche de forme en niveau de portance de type PF3 (plus de 120 Mpa de portance).

8.3.5.1 - Méthodologie de reprise

- Fraisage du corps de chaussée en matériaux bitumineux sur 17 cm et évacuation des AE en centrale d'enrobés
- Mise en œuvre d'une couche de cure + cloutage + gravillonnage sur la GTLH restante
- Mise en œuvre d'un Enrobé à module élevé de 9 cm en couche de base
- Mise en œuvre d'un enrobé bitumineux à module élevé sur 8 cm d'épaisseur.

8.3.5.2. Résultats du dimensionnement

La structure réalisée est modélisée en considérant les hypothèses fournies par le tableau 42.

Tableau 42 - Caractéristiques mécaniques retenues pour les matériaux et le sol support

Epaisseur (cm)	Matériaux	Module		
8	BBME	12 000	MPa	Module 15°C, 10Hz
9	EME 0/14	14 000	MPa	Module 15°C, 10Hz
-	Couche de forme existante	200	MPa	Module EV2
-	GTLH ruinée			

8.3.5.3. Vérification du dimensionnement

La vérification du dimensionnement est faite à l'aide du logiciel ALIZÉ. Les contraintes tangentielles à la base de l'EME et les déformations verticales dans le sol support ont été calculées et synthétisées dans le tableau 43.

Tableau 43 - Récapitulatif des contraintes et déformations calculées					
			Alizé	Admissible	U
σ	T	EME	82	108	μDef
ε	Z	SOL	267	514	μDef

8.3.5.4. Dimensionnement au gel de la structure bitumineuse

La structure est constituée de 8 cm BBME, de 9 cm EME reposant sur environ 20 cm de GTLH de l'ancienne structure, et sur près de 80 cm de couche de forme.

• Caractéristiques thermiques des matériaux

Tableau 44 - Caractéristiques thermiques des matériaux				
Matériaux	ρ (kg/m^3)	W (%)	λ_{ng} ($\text{w}/\text{m}^\circ\text{C}$)	λ_g ($\text{w}/\text{m}^\circ\text{C}$)
BBME	2,35	1	2,0	2,1
EME	2.39	1	2.3	2.4
GTLH	2.25	3	1.8	1.9
GNT	2,2	4	1,80	2,0
Sol	1,3	32	1,10	1,80

• Calcul thermique détaillé : le programme GEL 1D permet alors de calculer l'indice de gel admissible de la structure :

$$IA(^{\circ}\text{C}.\text{jour}) = 401^{\circ}\text{C}.\text{jour}$$

En conclusion, la structure bitumineuse a été vérifiée à l'aide du logiciel ALIZÉ.

Les deux solutions proposées en retraitement et en reconstruction conviennent sur le plan mécanique pour l'entretien structural de la chaussée. En revanche, les deux solutions induisent une perte légère de protection au gel par rapport à l'ancienne structure à cause de la réduction de l'épaisseur de la couche de fondation traitée.

Le tableau 45 récapitule l'ensemble des données de dimensionnement pour les deux solutions envisagées.

Le maître d'ouvrage choisira donc la solution en fonction des résultats de l'analyse économique et environnementale qui sera traitée en 8.4 - Choix de la solution d'entretien.

Tableau 45 - Récapitulatif de la démarche de dimensionnement et d'évaluation de la résistance au gel/dégel des deux solutions d'entretien envisagées dans le projet N°3

La structure en place	Structure	4 cm Béton Bitumineux Mince BBM/10 cm GB/ /25 cm Grave Traitée aux liants hydrauliques /80 cm couche de forme en GNT/Sol A1
	Caractéristiques mécaniques	Déflexion moyenne : 17/100 mm
	Indice de gel - logiciel GEL1D [9]	414 °C.jour
Hypothèses de dimensionnement	Trafic	T2 = 250 PL/j
	Portance du sol support	120 MPa
	Taux de croissance annuel du trafic	2%
	Période de service	20 ans
Retraitement de la chaussée en place à froid aux liants hydrauliques	Caractéristiques des matériaux de la chaussée existante	Courbe granulométrique à l'extérieur du fuseau de la norme NF EN 13285
		Valeur au bleu de méthylène VBS = 0.5 (< 0.8)
		Matériau ~ Qualité M 2
	Dosage en liant	4% LHR (70% laitier + 30% clinker)
	Qualité de retraitement	Niveau R 1 - Qualité de compactage q1
	Paramètres de calcul de dimensionnement conformément au guide « Retraitement en place des anciennes chaussées » [1]	Module du matériau retraité E = 18 000 MPa
		Contrainte à 10 ⁶ cycles $\sigma_6 = 0.55$
		Pente de la courbe de Fatigue (-1/b) = 16
		Dispersion sur les résultats en Fatigue $S_N = 1.5$
	Dimensionnement de la structure retraitée conformément au guide [1]	Dispersion sur l'épaisseur Sh = 4
		Coefficient d'agressivité moyen CAM = 1
		Risque r = 7.5%
		Coefficient de calage kd = 1.6
	Methodologie de retraitement	Fraisage de 6 cm de matériaux et évacuation en plate-forme de tri
		Fraisage de 33 cm du corps de chaussée
		Epandage du liant hydraulique (4%) et malaxage en place sur une épaisseur de 32 cm
Réalisation d'une couche de cure, cloutage et gravillonnage		
Mise en œuvre enrobé bitumineux à Module Elevé BBME d'épaisseur 6 cm		
Modélisation de la structure retraitée	Paramètres du guide [1]	
Vérification du dimensionnement à l'aide du logiciel ALIZÉ [5]	Contrainte à la base de la couche retraitée et déformation verticale dans le sol	
Dimensionnement gel Logiciel GEL1D [9]	Indice de gel = 397°C.jour	
Reconstruction en matériaux bitumineux	Modélisation de la structure avec le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussées » [4]	Fraisage de la structure en place sur 17 cm
		Mise en œuvre couche de cure, cloutage et gravillonnage sur Grave Traitée aux liants hydrauliques restante
		Mise en œuvre Enrobé à Module Elevé EME sur 9 cm Puis mise en œuvre Béton Bitumineux à Module Elevé BBME sur 8 cm
	Vérification du dimensionnement à l'aide du logiciel ALIZÉ [5]	Allongement à la base de la Grave Bitume et déformation verticale dans le sol support
Dimensionnement gel Logiciel GEL1D [9]	Indice de gel = 401°C.day	

8.4. Choix de la solution d'entretien

En fonction du contexte propre à chaque projet (distance carrière-centrale, distance centrale-chantier ou distance carrière-chantier, distance chantier-décharge, dosage du liant et distance usine-chantier), l'une ou l'autre technique peut s'imposer sur le plan économique et/ou sur le plan environnemental. Les prix indiqués dans tous les tableaux ci-après sont des prix moyens observés et sont donnés à titre indicatif.

8.4.1. La comparaison économique

8.4.1.1 - La méthodologie de l'évaluation

Elle consiste à comptabiliser les coûts de la réhabilitation des structures routières présentées dans les projets N°1, N°2 et N°3, depuis la fabrication des constituants de base jusqu'à la remise en service de la route. Les coûts unitaires retenus dans cette étude sont donnés dans le tableau 46 et correspondent aux coûts moyens actuels observés sur la France.

Tableau 46 - Récapitulatif des prix unitaires des matériaux et des techniques de mise en œuvre		
Matériaux – Matériels & Techniques	unité	Prix unitaire des matériaux et techniques / m²
Enduit superficiel	€/m ²	2
Liant routier	€/t	100
Mise en œuvre retraitement chaussée	€/m ³	4
Bitume	€/t	400
Densité enrobé		2,35
BB 6% bitume + 94 % granulats BB Fourniture 67% ; mise en œuvre 33% Enrobé BB (fab + mise en œuvre)	€/cm	2,12
Enrobé BBSG (fab + mise en œuvre)	€/cm	2,35
Grave Bitume		1,88
Densité Granulats		2,20
Rabotage	€/m ²	0,625
Transport	€/t.km	0,12

8.4.1.2 - Les résultats comparatifs

Les tableaux 47, 48 et 49 présentent les résultats de la comparaison économique des deux techniques retenues pour la réhabilitation des deux structures routières présentées dans les projets N°1, N°2 et N°3.

Il en ressort que la technique de retraitement est, pour les trois projets étudiés, plus économique que la technique de reconstruction. Cet avantage est respectivement de 42 %, 47 % et 51 % en faveur de la technique de retraitement.

Tableau 47 - Tableau comparaison économique : Retraitement vs Réfection - Projet 1					
Structure Trafic T4=40 PL/j	Structure en place	Technique d'entretien structurel			
		Réfection en solution bitumineuse		Retraitement en place au LHR	
Couche de surface	5 cm BB	5 cm BBSG	10,58 €	4 cm BBSG	9,75 €
Couche d'assise	25 cm GNT	12 cm GB3	16,92 €	Enduit superficiel	2,00 €
		Couche de protection	2,00 €	Retraitement en place sur 38 cm dosé à 4% de LHR (70% laitier)	5,52 €
		13 cm GNT restante	-		
Travaux préparatoires	-	Rabotage + Transport	1,64 €	Fraisage	0,625 €
Sol support	Sol A1 non traité Arase de classe AR1	Sol A1 non traité Arase de classe AR1	-	Sol A1 non traité Arase de classe AR1	-
Coût d'entretien structurel		31,14 €		17,90 €	

8.4.2. La comparaison environnementale

8.4.2.1 - La méthodologie de l'évaluation

Elle consiste à comptabiliser les impacts environnementaux engendrés par la réhabilitation des structures routières présentées dans les projets N°1, N°2 et N°3, depuis la fabrication des constituants de base jusqu'à la remise en service de la route. Les inventaires de fabrication des constituants sont issus de la base de données de :

- ATILH (Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques) en ce qui concerne le liant hydraulique routier,

Tableau 48 - Tableau comparaison économique : Retraitement vs Réfection - Projet 2

Structure Trafic T5=19 PL/j	Structure en place	Technique d'entretien structurel			
		Réfection en solution bitumineuse		Retraitement en place au LHR	
Couche de surface	Enduit Superficiel	5 cm BBSG	10,58 €	4 cm BBSG	9,75 €
Couche d'assise	30 cm GNT	12 cm GB3	16,92 €	Enduit superficiel	2,00 €
		Couche de protection	2,00 €	Retraitement en place sur 29 cm dosé à 4% de LHR (70% laitier)	4,21 €
		13 cm GNT restante	-		
Travaux préparatoires	-	Rabotage + Transport	1,64 €	Fraisage	0,625 €
Sol support	50 MPa	50 MPa	-	50 MPa	-
Coût d'entretien structurel		31,14 €		16,58 €	
Indice de gel admissible de la structure	91	69		116	

Tableau 49 - Tableau comparaison économique : Retraitement vs Réfection - Projet 3

Structure Trafic T2=247 PL/j	Structure en place	Technique d'entretien structurel			
		Réfection en solution bitumineuse		Retraitement en place au LHR	
Couche de surface	4 cm BBM	8 cm BBME	16,92 €	6 cm BBME	12,70 €
Couche de base	10 cm GB3	9 cm EME	21,15 €	Enduit superficiel	2,00 €
Couche de fondation	25 cm GC	22 cm GC	-	33 cm - 4% de LHR (70% laitier)	4,20 €
Travaux préparatoires	-	Rabotage + Transport	1,58 €	Fraisage	0,625 €
Couche de forme	80 cm GNT	80 cm GNT Déjà en place	-	80 cm GNT déjà en place	-
Coût d'entretien structurel		39,65 €		19,52 €	
Indice de gel admissible de la structure	IA = 414°C.jour	401°C.jour		397 °C.jour	

- UNPG (Union Nationale des Producteurs de Granulats) en ce qui concerne les granulats,
- EUROBITUME (Association européenne du bitume) en ce qui concerne le bitume,
- ECOINVENT (base de données environnementales universitaire Ecole Polytechnique de Zurich en Suisse et Université de Karlsruhe en Allemagne) en ce qui concerne l'eau et le fioul.

Dans ce guide, on a retenu les six principaux indicateurs environnementaux : consommation d'énergie, consommation d'eau, épuisement des ressources, émission de gaz à effet de serre, acidification et eutrophisation.

8.4.2.2 - Les résultats comparatifs

Les tableaux 50, 51 et 52 présentent les résultats de la comparaison des deux techniques retenues pour la réhabilitation des deux structures routières présentées dans les projets N°1, N°2 et N°3.

Tableau 50 - Tableau comparaison impacts environnementaux Retraitement vs Réfection - Projet 1		
Impacts Environnementaux Structure pour Trafic T4 = 40 PL/j	Décassement partiel	Retraitement de chaussée
Couche de surface	5 cm BB	4 cm béton bitumineux
Structure	12 cm GB	38 cm dosé à 4% LHR
Energie (MJ)	1,0013E+03	3,95E+02
Eau (Kg)	1,1041E+02	1,08E+02
Epuisement des Ressources (kg eq Sb)	4,6796E-01	1,73E-01
Déchets (kg)	1,7058E+00	1,22E+00
Déchets radioactifs (kg)	5,2830E-01	1,41E-01
GES (kg CO ₂)	1,5793E+01	1,46E+01
Acidification (kg SO ₂)	5,2615E-02	4,35E-02
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻)	4,4899E-03	1,09E-02

Il en ressort que la technique de retraitement possède un profil environnemental moins impactant que celui de la technique de reconstruction, et ceci pour tous les indicateurs étudiés.

**Tableau 51 - Tableau comparaison impacts environnementaux
Retraitement vs Réfection - Projet 2**

Impacts Environnementaux Structure pour Trafic T5 = 19 PL/j	Décassement partiel	Retraitement de chaussée
Couche de surface	5 cm BB	4 cm béton bitumineux
Structure	12 cm GB	29 cm dosé à 4% LHR
Energie (MJ)	1,0013E+03	3,7175E+02
Eau (Kg)	1,1041E+02	8,9058E+01
Epuisement des Ressources (kg eq Sb)	4,6796E-01	1,6515E-01
Déchets (kg)	1,7058E+00	1,0470E+00
Déchets radioactifs (kg)	5,2830E-01	1,3750E-01
GES (kg CO₂)	1,5793E+01	1,2095E+01
Acidification (kg SO₂)	5,2615E-02	3,6531E-02
Eutrophisation (kg PO₄³⁻)	4,4899E-03	8,5801E-03

**Tableau 52 - Tableau comparaison impacts environnementaux
Retraitement vs Réfection - Projet 2**

Impacts Environnementaux Structure pour Trafic T2 = 247 PL/j	Décassement partiel	Retraitement de chaussée
Couche de surface	8 cm BBME	6 cm béton bitumineux
Structure	9 cm EME	33 cm dosé à 4% LHR
Energie (MJ)	1,2560E+03	5,2975E+02
Eau (Kg)	1,1644E+02	1,1124E+02
Epuisement des Ressources (kg eq Sb)	5,8871E-01	2,3795E-01
Déchets (kg)	2,1451E+00	1,3741E+00
Déchets radioactifs (kg)	5,2927E-01	2,0113E-01
GES (kg CO₂)	1,6948E+01	1,5187E+01
Acidification (kg SO₂)	6,0183E-02	4,6657E-02
Eutrophisation (kg PO₄³⁻)	5,0956E-03	1,0195E-02



Chapitre 9

Démarche de qualité et contrôles

9.1 - Objectifs essentiels de l'assurance qualité

9.2 - Facteurs de succès d'un chantier de retraitement

- 9.2.1 - Travaux de préparation
- 9.2.2 - Épandage
- 9.2.3 - Malaxage
- 9.2.4 - Régalage
- 9.2.5 - Pré-compaction
- 9.2.6 - Pré-fissuration
- 9.2.7 - Réglage
- 9.2.8 - Compactage final
- 9.2.9 - Protection du matériau

9.3 - L'assurance qualité

- 9.3.1 - Définition de la qualité requise
- 9.3.2 - Plan de contrôle
- 9.3.3 - Points sensibles
- 9.3.4 - Points d'arrêt

Pour un retraitement de chaussée en place à froid aux liants hydrauliques, comme pour toute opération de construction ou d'entretien routier, l'obtention de la qualité requise est un impératif.

La mise en place d'un système d'assurance de la qualité est d'autant plus nécessaire qu'un chantier de retraitement de chaussée se déroule dans un contexte spécifique, différent de celui des techniques traditionnelles et le Cahier des Clauses Techniques Particulières CCTP doit préciser les étapes incontournables à prendre en compte dans la démarche qualité, pour garantir les performances finales de l'ouvrage.

En effet, le chantier de retraitement est confronté à quelques situations particulières qu'il s'agit de maîtriser. Elles tiennent d'abord au fait que le matériau de départ est le matériau de l'ancienne chaussée, dont les caractéristiques peuvent être variables ou très dispersées.

Un autre type d'aléa est relatif à l'éventuelle modification de l'état hydrique du matériau en fonction des conditions météorologiques régnant au cours du chantier.

Par conséquent, les caractéristiques du matériau doivent être vérifiées à l'avancement, avant malaxage avec le liant, pour s'assurer en permanence (et à temps) de la nature du matériau, de sa classe d'homogénéité, de son état hydrique effectif et des volumes de matériau homogène disponibles. De plus, puisque le retraitement est réalisé avec malaxage en place, certains paramètres (finesse, dosages, épaisseurs) peuvent présenter une dispersion relativement élevée.

9.1 - Objectifs essentiels de l'assurance qualité

Les principaux buts de l'assurance qualité, en matière de retraitement de chaussée, peuvent être résumés comme suit :

• Garantir partout l'obtention des performances minimales visées

Selon les cas, les caractéristiques concernées sont le module à court ou long terme, la résistance à la compression ou à la traction, etc.

Le jugement du résultat s'appuie sur l'évaluation statistique des mesures de contrôle, prenant ainsi en compte leur dispersion (attendue). Les performances géométriques (épaisseurs, nivellement, pentes) entrent également en ligne de compte.

• Aider à gérer au mieux les aléas

L'objectif est de réagir, en temps réel et de manière optimale, à des variations de l'état du matériau et à des événements météorologiques, de sorte à :

- maîtriser les délais d'exécution ;
- optimiser la consommation de liant(s).

• **Contribuer à la préservation de l'environnement**

Plusieurs actions peuvent concourir à atteindre ce but : réduction ou élimination des mises en décharges, optimisation de la consommation de liant, adaptation des procédures de malaxage et de compactage, réduction ou suppression des émissions de poussière.

9.2 - Facteurs de succès d'un chantier de retraitement

La réussite d'un chantier de retraitement est largement tributaire de :

- **La qualité des études préalables** (une reconnaissance précise du gisement, une étude en laboratoire adaptée au cas de chantier),
- **La qualité des fournitures** (les liants, les granulats d'apport le cas échéant),
- **La qualité du matériel** (épandeurs, pulvimixeurs, compacteurs),
- **La définition d'un plan qualité apte à garantir le niveau de qualité visé,**
- **La réalisation d'épreuves de convenance,**
- **Le contrôle de conformité pendant la réalisation.**

Par ailleurs, il faut souligner que le management de la qualité doit démarrer bien avant le démarrage du chantier, dès les campagnes de reconnaissance et la conception du projet.

9.2.1 - Travaux de préparation

Dans le cas d'un chantier urbain, les travaux préparatoires pourront consister au démontage des émergences (regards, bouche à clés, etc) qui seront remontées après la réalisation du retraitement.

Dans les sites boisés ou pour des chaussées particulièrement sales, il est indiqué de nettoyer la surface à retraiter afin de minimiser la quantité de matière organique dans le mélange. Lorsque au moins 10 % des graviers présents sont supérieurs à 80 mm ou si des blocs supérieurs à 125 mm se trouvent parmi le matériau à retraiter, il est nécessaire de concasser le matériau à l'aide d'une unité de broyage mobile.

Lorsque l'épaisseur des couches d'asphalte est supérieure à 1/3 de l'épaisseur de la couche à retraiter, il est impératif d'enlever l'excédent.

Des matériaux d'apport (par exemple de la pierre calcaire concassée) sont posés sur la couche à retraiter lorsqu'il faut :

- augmenter l'épaisseur de la couche à retraiter ;
- élargir la route ;
- améliorer la granulométrie du matériau présent afin de correspondre au fuseau de la courbe de Talbot.

9.2.2 - Épandage

Pour se conformer à la qualité d'épandage nécessaire à l'obtention de la qualité de retraitement visée (R1 ou R2), et pour réduire et maîtriser la dispersion du liant, il faut retenir, un épandeur à dosage volumétrique, asservi à la vitesse d'avancement. Le contrôle de la régularité de l'épandage et de la quantité des liants est réalisé par la méthode dite "à la bêche".



Méthode de pesage dite "à la bêche"

9.2.3 - Malaxage

Pour se conformer à la qualité de retraitement visée (R1 ou R2), et pour assurer une bonne homogénéité du matériau et une profondeur homogène du malaxage, il faut retenir un malaxeur à rotor horizontal ou un atelier compact de reconditionnement. D'autre part, le malaxage foisonnant énormément les matériaux, il faut veiller, lorsqu'on retraits par bandes jointives, à mordre suffisamment (20 cm) dans la partie déjà foisonnée, pour ne pas laisser de matériau non malaxé en bordures de bandes.



Matériau retraité à la sortie du pulvimixeur.



Atelier de reconditionnement de chaussée : ARC 700 en action.

9.2.4 - Régalage

Le régalage est effectué à l'aide d'une niveleuse.

9.2.5 - Pré-compaction

L'atelier de compactage ainsi que le nombre de passes nécessaires seront définis sur une planche d'essais de compactage.



Après malaxage le matériau est pré-compacté.

Le compactage doit suivre sans tarder la fin du malaxage pour ne pas laisser un matériau foisonné exposé aux intempéries et parce que le délai de maniabilité diffère suivant qu'on utilise un ciment ou un liant hydraulique routier.

Le matériau retraité est pré-compacté à une énergie de compactage variant entre $1/3$ et $2/3$ de l'énergie totale de compactage, prévue par la norme NF P 98-115.

9.2.6 - Pré-fissuration

La pré-fissuration est une opération facultative. Elle est souhaitée chaque fois que le retraitement concerne la couche de base de la future chaussée et que le trafic prévu est supérieur ou égal à T3 (nombre de poids lourds par jour et par sens supérieur ou égal à 150). Elle est réalisée immédiatement après l'opération de pré-compactage. La pré-fissuration doit être réalisée sur toute la largeur des matériaux retraités. Lorsque la pré-fissuration est effectuée par bande, il faut veiller à leur alignement transversal.

9.2.7 - Réglage

Le réglage a pour but d'apporter à la chaussée son profil définitif. Il doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écêtage des bosses.

Cette opération doit suivre immédiatement le compactage sous peine d'être très vite difficile à réaliser à cause de la rigidification rapide du matériau retraité.

Elle se fait le plus souvent à la niveleuse. Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués.

L'épaisseur à raboter doit être prise en compte au stade du retraitement, en prévoyant une surépaisseur suffisante du matériau retraité (3 cm).

9.2.8 - Compactage final

Le compactage final consiste à densifier le matériau retraité jusqu'à l'obtention du niveau de compactage spécifié dans les pièces du marché.



Compactage après préfissuration.

9.2.9 - Protection du matériau

La protection du matériau retraité est assurée par un enduit de cure. Elle est destinée à protéger la couche retraitée des intempéries, de l'évaporation de l'eau et du trafic. Elle doit être réalisée dans les plus brefs délais après la fin du réglage. L'enduit de cure sera réalisé à la fin de chaque journée de travail. En cas de fortes chaleurs, il est conseillé de réaliser l'enduit de cure à la fin de chaque demi-journée de travail.

Dans le cas d'une remise en circulation immédiate, une couche de roulement provisoire est réalisée.



Gravillonnage après pulvérisation d'une émulsion de bitume.

9.3 - L'assurance qualité

Très schématiquement, quatre aspects requièrent une attention supplémentaire : l'homogénéité du matériau à traiter, le niveau des performances mécaniques, la faible dispersion des caractéristiques et la finesse du réglage.

9.3.1 - Définition de la qualité requise

La qualité visée est formalisée par l'ensemble des spécifications (générales et particulières) définissant les résultats à obtenir. Selon le type de marché, cet ensemble peut éventuellement être accompagné de prescriptions portant sur les méthodes et moyens à utiliser.

9.3.2 - Plan de contrôle

La qualité d'un chantier de retraitement est fortement tributaire des performances des matériels utilisés. Les différentes actions de contrôles et leurs méthodologies sont détaillées dans le tableau 53 (page 145).

9.3.3 - Points sensibles

Les points sensibles sont relativement nombreux.

- **Homogénéité du gisement du matériau à retraiter** : la reconnaissance du matériau de l'ancienne chaussée doit être effectuée le plus tôt possible, afin de pouvoir boucler l'étude, bien avant le début des travaux et, éventuellement, le modifier à l'aide d'un correcteur granulométrique. De plus, les caractéristiques du matériau doivent être vérifiées à l'avancement avant malaxage avec le liant. Il s'agit de s'assurer en permanence (et à temps) de la nature du matériau, de sa classe d'homogénéité, de son état hydrique effectif et des volumes de matériau homogène disponibles. L'ensemble de ces vérifications peut être considéré comme point d'arrêt.

- **Caractéristiques du matériau à retraiter** : outre les propriétés géotechniques habituelles, l'aptitude du matériau au retraitement doit être soigneusement évaluée (ce qui constitue une étape-clé dans le choix du ou des liant(s)). La taille des plus gros éléments du matériau doit, rappelons-le, être limitée en fonction du matériel de malaxage prévu. La plage des teneurs en eau probables doit aussi être estimée.

- **Liant(s) :**

- caractéristiques du ou des liant(s) ;
- disponibilité de ces liants ;
- capacité de stockage du ou des liant(s) ;

En plus de l'évaluation des performances, il faut s'assurer que les quantités de liant(s), pouvant être nécessaires dans le cas le plus défavorable, pourront être livrées dans les temps.

- **Matériel :**

- adéquation et performances du ou des épandeur(s) : débit, exactitude et précision du dosage, etc. ;
- adéquation et performances du ou des pulvimalaxeur(s) : puissance, maîtrise de l'épaisseur, finesse de mouture, exactitude et précision du dosage, etc. ;
- adéquation et performances des compacteurs : rendement, efficacité ;
- teneur en eau naturelle trop élevée ;
- teneur en eau naturelle trop basse ;
- argilosité excessive.

- **Protection de la couche retraitée**

Afin d'améliorer la tenue future de l'interface avec la couche de surface, il faut s'assurer que toutes les mesures sont prises pour :

- obtenir une compacité élevée, mais éviter (ou éliminer) le feuilletage : choix des compacteurs, plan de compactage, recoupe éventuelle ;
- régler et maintenir la teneur en eau dans la plage optimale, afin que la prise se développe correctement (arrosage, couche de cure) ;
- interdire la circulation du trafic de chantier tant que le matériau n'a pas suffisamment durci et que la couche de protection n'a pas été appliquée.

9.3.4 - Points d'arrêt

L'assurance de la qualité va de pair avec la gestion d'assez nombreux points d'arrêt. Les principaux sont décrits ci-après, avec les mesures pour les lever.

- **Acceptation du ou des liant(s) fournis.**

- Évaluation du Plan d'Assurance de la Qualité PAQ du ou des fournisseurs.
- Essais de vérification de la conformité du ou des liant(s) approvisionnés sur le chantier : sur liant et sur mélange sol + liant.

- **Acceptation des matériels** (données constructeurs, état d'entretien, réglages) :

- du ou des épandeurs (débit, exactitude et précision des dosages) ;
- du ou des pulvimalaxeurs (puissance, maîtrise de l'épaisseur, finesse de mouture, précision et exactitude des dosages en eau et en liant, etc.) ;
- des compacteurs (rendement, efficacité, etc.) ;
- des autres engins (arroseuses, niveleuses, matériels d'enduisage, etc.).

L'acceptation et les éventuelles modifications des matériels sont souvent décidées à l'issue d'une épreuve de convenance, pour les grands chantiers.

- **Acceptation des méthodes d'exécution.**

Comme pour les matériels, l'acceptation des méthodes peut être décidée après épreuve(s) de convenance.

- **Vérification de la compacité** si elle est insuffisante :

- passes de compactage supplémentaires (dans le délai de maniabilité) ;
- ajustement de la teneur en eau ;
- éventuellement modification de l'atelier de compactage.

- **Prévision d'apparition de gel dangereux :**

- augmentation du dosage en liant et/ou emploi d'un liant à prise plus rapide ;
- au pire, arrêt du chantier.

- **Prévision d'un épisode de vent très fort :** arrêt momentané du chantier.

- **Vérification du nivellement et de l'épaisseur.** Si l'un des deux n'est pas conforme, il faudra :

- soit retravailler le matériau (dans son délai de maniabilité) ;
- soit l'enlever et le remplacer ;
- soit revoir le dimensionnement des couches supérieures.

- **Vérification des performances mécaniques** (mesures à la plaque ou déflexions + mesures de caractéristiques mécaniques sur prélèvements obtenus par carottage).

Cette vérification a lieu bien après la fin du délai de maniabilité. Si elle démontre un niveau de performances insuffisant, on devra alors enlever le matériau non conforme et le remplacer.

- **Vérification de la protection superficielle**

Le trafic de chantier ne pourra être autorisé sur la couche de protection qu'à la double condition qu'elle ait reçu la protection superficielle prévue (et soigneusement appliquée) et que le matériau retraité ait atteint un niveau de résistance suffisant.

Actions et documents d'assurance de la qualité (généralités)

1 - Variantes contractuelles

La nature du marché conditionne l'architecture du système qualité du projet.

Selon le type de marché donné (appel d'offres classique, ouverture aux variantes, concours, concession, partenariat public-privé), les dispositions contractuelles réservent une place plus ou moins étendue aux choix techniques faits par l'entreprise.

Cette liberté est quasi-nulle dans le cadre de certains marchés, dans lesquels toutes les stipulations sont du ressort du maître d'oeuvre, l'entreprise étant alors réduite à un simple rôle d'exécutant. À l'inverse, d'autres types de marché accordent une grande place aux initiatives de l'entreprise, les cas extrêmes étant ceux de la concession ou du partenariat dans lesquels l'entrepreneur est concepteur, et maître de ses options techniques avec obligation de résultats en termes de niveaux de service de l'ouvrage. Depuis des années, la tendance est clairement à une ouverture aux initiatives - et à la responsabilisation - de l'entreprise.

Le système d'assurance de la qualité est bâti en fonction du cadre contractuel dans lequel il doit s'appliquer.

2 - Actions et documents

Les premiers documents sur lesquels se fonde le système d'assurance qualité du chantier sont les **Manuels Qualité** des différents intervenants : **entreprise, sous-traitants, fournisseurs** et aussi - il faut le souligner - **maître d'oeuvre**, ainsi que, le cas échéant, le ou les contrôleurs extérieurs. Pour obtenir une qualité totale, il est essentiel que tous les acteurs soient impliqués, et ceci dès le début même de la conception.

La démarche qualité se concrétise, pour le projet considéré, par le **Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ)** qui, comme souligné plus haut, doit impliquer tous les intervenants sans exception. Les PAQ décrivent avec précision les méthodes et procédures à appliquer, par exemple :

- la manière d'organiser les épreuves de convenance ;
- l'organisation de chantier (organigrammes, ordonnancement des tâches, etc.) ;
- les modalités d'exécution des différentes tâches, y compris la définition des matériels nécessaires ;
- les procédures de détection et de corrections des anomalies ;
- la traçabilité des différentes informations.

Le Schéma Directeur de la Qualité (SDQ) coiffe l'ensemble des PAQ, en mettant en cohérence les diverses actions prévues. L'ensemble de la démarche aboutit, de manière non exhaustive, à la production :

- du Plan de contrôle ;
- de la liste des situations considérées comme des points sensibles pour le déroulement du chantier ;
- de la liste des points d'arrêt ;
- de la définition éventuelle de la façon de traiter certains problèmes ou situations spécifiques au chantier considéré.

La synthèse des actions qualité est incluse dans le dossier de récolement du chantier.

Tableau 53 - Liste des contrôles à réaliser durant toutes les opérations de chantier

	Démarche Qualité	Essais à réaliser	Fréquence des essais/nombre	Seuil à respecter	
				Qualité R1	Qualité R2
Études préalables	Retraitement en solution de base - Études à la charge du maître d'œuvre	Sondage - Échantillonnage - Analyse des matériaux	2 à 3 au kilomètre		
	Retraitement en variante - Études à la charge de l'entreprise - Résultats à valider par le contrôle extérieur	Conformément à la norme NF P 98 114-1			
Contrôle des fournitures	Granulats d'apport ou correcteur granulométrique	Epreuve de convenue	Début du chantier	Selon PAQ du fournisseur	
		Vérification de la fourniture	Par lots		
	Liant	Prélèvement conservatoire	1 par porteur		
		Essai sur mortier	1 par semaine	Conformément à la norme NF EN 196-1	
Epreuve de convenue de fabrication	Epandage liant : épandeur ayant un Avis Technique	Dosage surfacique	10 points (Début chantier)	± 10%	± 25%
	Epandage liant : épandeur n'ayant pas un Avis Technique	Dosage surfacique	20 points (Début chantier)	± 10%	± 25%
	Malaxage : humidification	Teneur en eau	10 points	± 0,5%	± 1%
	Malaxage : profondeur de traitement	Sondage	10 points	± 5%	± 10%
	Malaxage : finesse de mouture	Granulométrie	5 essais	± 10% à D	
Epreuve de convenue de mise en oeuvre	Contrôle de l'épaisseur retraitée	Sondage	10 points (début chantier)	± 5%	± 10%
	Calcul du débit de l'atelier de compactage			≥ débit d'épandage + malaxage	
	Contrôle du compactage	Masse volumique Gammadensimètre GPV	20 points	q ₁	q ₂
	Respect du délai de maniabilité			Délai de mise en oeuvre ≤ délai de maniabilité	
Contrôle de conformité de fabrication	Contrôle de l'épandage du liant	Dosage surfacique	5 par jour (petit chantier) 10 par jour (grand chantier)	± 10%	± 25%
	Contrôle de l'humidité du mélange	Teneur en eau	5 par jour (petit chantier) 10 par jour (grand chantier)	± 0,5%	± 1%
	Contrôle de la profondeur du traitement	Sondage	3 par jour (petit chantier) 10 par jour (grand chantier)	± 5%	± 10%
	Contrôle de la finesse de mouture	Granulométrie	3 par jour (petit chantier) 10 par jour (grand chantier)	± 10%	± 10%
	Fonctionnement du compacteur à pneus	Pression au sol	1 par jour	± 10%	± 10%
	Fonctionnement du compacteur vibrant	Fréquence amplitude	1 par jour	± 10%	± 10%
	Vitesse de translation	Mesure vitesse	1 par jour	± 10%	± 10%
	Exploitation du contrôlographe		1 par jour		
	Tonnage compactable C / Tonnage retraité R		1 par jour	C ≥ R	
	Géométrie		1 par jour	Conformément à la norme NF P 98 115	
	Uni	APL	Fin de chantier ou de lot	Conformément à la Circulaire 84 - 50	
	Homogénéité du retraitement	Eprouvette	Durant chantier et après un an		
Déflexion		Fin chantier ou de lot	Selon la technique et l'âge		



Chapitre **10** Conclusion

Depuis des décennies, la **communauté technique française** (concepteurs, fournisseurs de matériaux et liants, fabricants de matériels, entreprises, réseau scientifique et technique du Ministère de l'Équipement) a travaillé inlassablement et efficacement à la mise au point et au développement de la technique de retraitement des chaussées en place à froid aux liants hydrauliques. Cette communauté a réussi à faire améliorer les techniques et les procédés, à élaborer de nouveaux produits, à codifier et à communiquer toujours avec un souci clairvoyant d'optimiser, de rationaliser, de préserver la biodiversité et les ressources.

Aujourd'hui, la technique de retraitement des chaussées en place aux liants hydrauliques est parfaitement au point. C'est une technique de traitement à froid, donc peu consommatrice d'énergie. Elle repose sur l'exploitation optimale du « gisement » de matériaux présents dans la chaussée à restructurer et sur son traitement « en place ». Cette technique présente donc de nombreux atouts pour l'entretien des chaussées.

• **Sur le plan environnemental**

- Réduction des Gaz à Effet de Serre (GES)
- Économies d'énergie et de carburant
- Préservation des ressources non renouvelables

• **Sur le plan sociétal**

- Réduction des nuisances liées aux approvisionnements du chantier
- Réduction des délais d'intervention
- Travaux sous circulation possibles
- Sécurité accrue
- Moindre gêne des usagers

• **Sur le plan technique**

- Durée de vie supérieure aux autres techniques d'entretien
- Meilleure résistance aux cycles de gel/dégel
- Maintien des niveaux des ouvrages urbains (trottoirs, caniveaux,...)

• **Sur le plan économique**

- Coût extrêmement compétitif

Avec tous ces atouts, cette technique est appelée à se développer sur tout le réseau routier français, assurant ainsi sa tenue vis-à-vis des sollicitations du trafic et des conditions climatiques, et garantissant sa pérennité et sa durabilité.



Chapitre **11** Bibliographie

- [1] Guide Technique Retraitement en place des anciennes chaussées – SETRA/LCPC - 2003
- [2] Retraitement en place à froid des anciennes chaussées aux liants hydrauliques – CCTP-Type, T 58 CIMBÉTON, 2008.
- [3] Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic, LCPC-SETRA, juillet 1981.
- [4] Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Guide technique SETRA-LCPC, décembre 1994.
- [5] ALIZÉ III : Logiciel de dimensionnement des structures de chaussées routières - SETRA/LCPC.
- [6] Utilisation des matériaux de Haute-Normandie. Guide technique. Le retraitement en place à froid des anciennes chaussées. CETE Normandie Centre – DRE Haute-Normandie, Mars 2000.
- [7] Etude comparative en technique routière. Retraitement des chaussées en place vs renforcement. Méthode graphique de comparaison économique et environnementale.
- [8] Logiciel d'évaluation et de comparaison économique et environnementale en technique routière - CIMBÉTON 2013
- [9] Algorithme de calcul GEL1D pour la vérification au gel/dégel des structures - SETRA/LCPC.
- [10] Catalogue des structures types de chaussées neuves - SETRA/LCPC, 1998



Chapitre **12** Normes

Normes relatives aux liants

NF EN 197-1 : Ciment – partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

NF P 15 108 : Liants hydrauliques – Liants hydrauliques routiers – Composition, spécifications et critères de conformité.

NF EN 459-1 : Chaux de construction - Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité.

EN 13282 : Les liants hydrauliques routiers seront définis prochainement par une norme européenne EN 13282 (Parties 1 et 2) « Liants Hydrauliques Routiers à durcissement rapide et/ou normal ».

NF EN 13282-1 : Liants hydrauliques routiers – Composition, spécifications et critères de conformité des liants hydrauliques routiers à durcissement rapide.

NF EN 13282-2 : Liants hydrauliques routiers – Composition, spécifications et critères de conformité des liants hydrauliques routiers à durcissement normal. 150

Normes relatives aux matériaux

NF EN 14227-1 : Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 1 : Mélanges granulaires liés au ciment.

NF EN 14227-5 : Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 5 : Mélanges granulaires traités au liant hydraulique routier.

NF EN 14227-10 : Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 10 : Sols traités aux ciments.

NF EN 14227-13 : Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 13 : Sols traités aux liants hydrauliques routiers.

NF EN 13 242 : Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées.

NF EN 13 285 : Graves non traitées – Spécifications.

XP P 18 545 : Granulats – Éléments de définitions, conformité et codification.

NF P 11 300 : Exécution des terrassements – Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructure routière.

NF P 11 301 : Exécution des terrassements – Terminologie.

NF P 98 080 : Chaussées – Terrassement – Dimensionnement – Partie 1 : Terminologie générale.

NF P 98 100 : Assises de chaussées – Eau pour assises – Classification.

NF EN 12271 : Enduits superficiels – Spécifications.

Normes relatives à la méthodologie d'étude

NF P 98 114-1 : Assises de chaussées - Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques - Partie 1 : Graves traitées aux liants hydrauliques.

NF P 98 114-2 : Assises de chaussées - Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques - Partie 2 : Sables traités aux liants hydrauliques.

NF P 98 114-3 : Assises de chaussées - Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques - Partie 3 : Sols traités aux liants hydrauliques.

NF P 98 230-3 : Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités – Partie 3 : Fabrication en laboratoire de mélanges de graves ou de sables pour la confection d'éprouvettes.

NF EN 13 286-50 : Mélanges traités aux liants hydrauliques et mélanges non traités – Partie 50 : Méthode de confection par compactage avec un appareillage Proctor ou une table vibrante des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques.

NF EN 13 286-53 : Mélanges traités aux liants hydrauliques et mélanges non traités – Partie 53 : Méthode de confection par compression axiale des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques.

Normes relatives aux essais en laboratoire

NF P 94 049 - 1 : Sols - Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – Partie 1 – Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes.

NF P 94 049 - 2 : Sols - Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – Partie 2 – Méthode à la plaque chauffante ou panneaux rayonnants.

NF P 94 050 : Sols - Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – Méthode par étuvage.

NF P 94 051 : Sols - Reconnaissance et essais – Indice de plasticité Ip.

NF P 94-055 : Sols – Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un sol – Méthode chimique.

NF P 94 056 : Sols - Reconnaissance et essais – Analyse granulométrique – Méthode par tamisage à sec après lavage.

NF P 94-066 : Sols – Reconnaissance et essais – Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux.

NF P 94-067 : Sols – Reconnaissance et essais – Dégradabilité.

NF P 94 068 : Sols - Reconnaissance et essais – Mesure de la capacité d'absorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache.

NF P 18-576 : Granulats. Mesure du coefficient de friabilité des sables.

NF P 94 078 : Sols - Reconnaissance et essais – Indice CBR après immersion – Indice CBR immédiat – Indice Portant immédiat. Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.

NF P 94 093 : Sols - Reconnaissance et essai de compactage Proctor – Détermination des références de compactage d'un matériau – Essai Proctor modifié – Essai Proctor normal.

NF P 94 100 : Sols - reconnaissance et essais. Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement.

NF EN 933-9 : Essais pour déterminer les caractéristiques géotechniques des granulats – Partie 9 : Qualification des fines. Essai au bleu de méthylène.

NF EN 1097-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 1 : Détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval)

NF EN 1097-2 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation (Los Angeles)

NF EN 13286-2 : Mélanges traités aux liants hydrauliques et mélanges non traités - Partie 2 : Méthodes d'essai de détermination en laboratoire pour la masse volumique de référence et de la teneur en eau. Compactage Proctor.

NF EN 13286-3 : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 3 : méthodes d'essai de détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et la teneur en eau – Vibro-compression à paramètres contrôlés.

NF EN 13286-40 : Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités – Partie 40 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la traction directe des mélanges traités aux liants hydrauliques.

NF EN 13286-41 : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.

NF EN 13286-42 : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 42 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques.

NF EN 13286-43 : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 43 : Méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants hydrauliques.

NF EN 13286-45 : Mélanges traités aux liants hydrauliques et mélanges non traités – Partie 45 : Méthode d'essai pour la détermination du délai de maniabilité des mélanges traités aux liants hydrauliques.

NF EN 13286-47 : Mélanges traités aux liants hydrauliques et mélanges non traités – Partie 47 : Méthodes d'essai pour la détermination de l'indice portant californien (CBR), de l'indice de portance immédiate (IPI) et du gonflement.

NF EN 13286-49 : Mélanges traités aux liants hydrauliques et mélanges non traités – Partie 49 : Essai de gonflement accéléré pour les sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.

NF EN 13286-52 : Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités – Partie 52 : Méthode de confection par vibro-compression des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques.

NF EN 13286-53 : Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités – Partie 53 : Méthode de confection par compression axiale des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques.

Normes relatives au dimensionnement

NF P 98-080 : Chaussée – Terrassements – Dimensionnement – Partie 1 : Terminologie générale.

NF P 98-082 : Chaussée – Terrassements – Dimensionnement des chaussées routières – Détermination des trafics routiers pour le dimensionnement des structures de chaussées.

NF P 98-086 : Dimensionnement des structures des chaussées routières – Application aux chaussées neuves.

Normes relatives à la mise en œuvre

NF P 98 115 : Assises de chaussées - Exécution des corps de chaussées - Constituants - Composition des mélanges et formulation - Exécution et contrôle.

NF P 98-105 : Assises de chaussées – Fabrication en continu des mélanges – Contrôle de fabrication des graves et sables traités aux liants hydrauliques ou non traités en centrale de malaxage continu.

Normes relatives aux essais de contrôle sur chantier

XP P 94 063 : Sols – Reconnaissance et essais – Contrôle de la qualité de compactage – Méthode au pénétromètre dynamique à énergie constante. Principe et méthode d'étalonnage des pénétrodensitographes – Exploitation des résultats - Interprétation.

XP P 94 105 : Sols – Reconnaissance et essais – Contrôle de la qualité de compactage – Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable. Principe et méthode d'étalonnage du pénétromètre – Exploitation des résultats - Interprétation.

NF P 94 114-2 : Sols - Reconnaissance et essais – Portance des plates-formes – Partie 2 : Module sous chargement dynamique.

NF P 94-117-1 : Sols – Reconnaissance et essais – Portance des plates-formes – Partie 1 : Module sous chargement statique à la plaque (EV2).

NF P 94-117-2 : Sols – Reconnaissance et essais – Portance des plates-formes – Partie 2 : Module sous chargement dynamique.147

NF P 94 117-3 : Sols : reconnaissance et essais - Portance des plates-formes - Partie 3 : coefficient de réaction de Westergaard sous chargement statique d'une plaque.

NF P 94 118 : Chaussées – Terrassements – Exécution des terrassements – Caractérisation des sols en place – Essai à la dynaplaque.

NF P 98 200 : Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion.

NF P 98-200-1 : Essais relatifs aux chaussées. Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante. Partie 1 : Définitions, moyens de mesure, valeurs caractéristiques.

NF P 98-200-2 : Essais relatifs aux chaussées. Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante. Partie 2 : Détermination de la déflexion et du rayon de courbure avec le deflectomètre Benkelman modifié.

NF P 98-200-3 : Essais relatifs aux chaussées. Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante. Partie 3 : Détermination de la déflexion avec le deflectographe 02.

NF P 98-200-4 : Essais relatifs aux chaussées. Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante. Partie 4 : Détermination de la déflexion avec le deflectographe 03.

NF P 98-200-5 : Essais relatifs aux chaussées. Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante. Partie 5 : Détermination de la déflexion avec le deflectographe 04.48

NF P 98-200-6 : Essais relatifs aux chaussées. Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante. Partie 6 : Détermination de la déflexion avec le deflectographe béton.

NF P 98-200-7 : Essais relatifs aux chaussées – Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante. Partie 7 : Détermination de la déflexion et du rayon de courbure avec un curviamètre.

NF P 98 218-1 : Essais relatifs aux chaussées – Essais liés à l'uni – Partie 1 : Mesure avec la règle fixe de trois mètres.

NF P 98 218-2 : Essais relatifs aux chaussées – Essais liés à l'uni – Partie 2 : Mesure avec la règle roulante de trois mètres.

NF P 98-234-1 : Essais relatifs aux chaussées – Comportement au gel des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 1 : Essai de résistance au gel-dégel des graves et sables traités.

NF P 98-234-2 : Essais relatifs aux chaussées – Comportement au gel – Partie 2 : Essai de gonflement au gel des sols et matériaux granulaires traités ou non de D inférieur ou égal 20 mm.

NF P 98-275-1 : Essais relatifs aux chaussées – Détermination du dosage en liant répandu – Partie 1 : Essai *in situ* de dosage moyen et de régularité transversale.

NF P 98-276-2 : Essais relatifs aux chaussées – Mesure du dosage en granulats d'un enduit superficiel – Partie 2 : Détermination de la régularité transversale.

Normes relatives aux matériels

La série des normes NF P 98 701 à NF P 98 772.

NF P 98-701 : Matériels pour la construction des routes – Centrales de traitement de matériaux – Terminologie et performances.

NF P 98-705 : Matériels de construction et d'entretien des routes – Compacteurs – Terminologies et spécifications commerciales.

NF P 98-732-1 : Matériels de construction et d'entretien des routes – Fabrication des mélanges – Partie 1 : Centrale de malaxage pour matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités.

NF P 98-736 : Matériels de construction et d'entretien des routes – Matériel de compactage – Classification.

NF P 98-737 : Matériels de construction et d'entretien des routes – Matériel de compactage – Évaluation.

NF P 98-744-1 : Matériels de construction et d'entretien des routes – Calibrage et vérification des réglages sur chantier des doseurs continus des centrales de production de matériaux – Partie 1 : Débitmètre de bande pour courroie transporteuse.

NF P 98-744-2 : Matériels de construction et d'entretien des routes – Calibrage et vérification des réglages sur chantier des doseurs continus des centrales de production de matériaux – Partie 2 : Doseur pondéral à granulats.

NF P 98-744-3 : Matériels de construction et d'entretien des routes – Calibrage et vérification des réglages sur chantier des doseurs continus des centrales de production de matériaux – Partie 3 : Doseur volumétrique à granulats.

NF P 98-744-4 : Matériels de construction et d'entretien des routes – Calibrage et vérification des réglages sur chantier des doseurs continus des centrales de production de matériaux – Partie 4 : Doseur pondéral à pulvérulent – Essai par prélèvement sur courroie.

NF P 98-744-5 : Matériels de construction et d'entretien des routes – Calibrage et vérification des réglages sur chantier des doseurs continus des centrales de production de matériaux – Partie 5 : Doseur pondéral à pulvérulent – Essai par pesée matière.

NF P 98-760 : Matériels de construction et d'entretien des routes – Compacteurs à pneumatiques – Évaluation de la pression de contact au sol.

NF P 98-761 : Matériels de construction et d'entretien des routes – Compacteurs – Évaluation du moment d'excentrique.

NF P 98-768 : Chaussée – Terrassements – Qualification du matériel routier – Terminologie des matériels de compactage.

NF P 98-772-1 : Matériels de construction et d'entretien des routes – Module d'acquisition de données pour centrales de fabrication des mélanges granulaires – Description et spécification fonctionnelles. Partie 1 : Module pour la fabrication en continu.



Chapitre

13 Abréviations & symboles

AFNOR	Association Française de NORmalisation
APL	Analyseur de Profil en Long
BB	Béton Bitumineux
CAM	Coefficient d'Agressivité Moyen du trafic Poids Lourds réel
CATM	Certificat d'Aptitude Technique des Matériels routiers
CBR	Californian Bearing Ratio
CCTG	Cahier des Clauses Techniques Générales
CCTP	Cahier des Clauses Techniques Particulières
CFTR	Comité Français pour les Techniques Routières
C_v	Coefficient de Variation = écart type / moyenne
C_{VE}	Coefficient de Variation de l'épaisseur après malaxage
C_{VL}	Coefficient de Variation Longitudinale de l'épandeur de liant
C_{VT}	Coefficient de Variation Transversale de l'épandeur de liant
D	Dimension maximale d'un granulat
DRCR	Direction des Routes et de la Circulation Routière
ES	Enduit Superficiel
Et	Module élastique en traction
GPV	Gammadensimètre à Profondeur Variable (appareil de mesure de la masse volumique du matériau)
GTR	Guide Technique pour la réalisation des Remblais et des couches de forme
HEPIL	Critères de qualification des malaxeurs
IPI	Indice Portant Immédiat
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LTV	Critères de qualification des épandeurs de liant
M_i	Classe de qualité granulométrique des mélanges retraités
MJA	Moyenne Journalière Annuelle du trafic Poids Lourds
NE	Nombre Equivalent d'essieux de référence correspondant au trafic poids lourds cumulé sur la durée de calcul retenue
P_i	Classe du compacteur à pneus

P_i	Classe de portance des sols (classification dans le cas des chaussées à faible trafic)
PAQ	Plan d'Assurance de la Qualité
PL	Poids Lourds
q₁	Objectif de densification pour le compactage des assises de chaussées (couche de base)
q₂	Objectif de densification pour le compactage des assises de chaussées (couche de fondation)
R_i	Niveau de qualité de retraitement
R_t	Résistance à la traction directe
R_{tb}	Résistance à la traction par écrasement en compression diamétrale (dit brésilien)
SDQ	Schéma Directeur de la Qualité
SETRA	Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes
T_i	Classe de trafic Poids Lourds (PTAC > 3,5 t) en moyenne journalière annuelle sur la voie la plus chargée
VBS	Valeur de Bleu de méthylène du Sol
V_i	Classe du compacteur vibrant
Δh	Correction d'épaisseur en fonction de la portance du sol support (cas de la chaussée à faible trafic).

Crédits photographiques :
Romualda Holak, Cimbéton, X
Tous droits réservés

Réalisation :
Îlot Trésor / sôa
RCS Paris B 408 745 149
Édition décembre 2013

CIM *béton*

CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10
E-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr