

REPUBLIQUE DU SENEGAL

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



GC 487

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

Centre de Thiès

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE
CONCEPTION

Titre :

**Réhabilitation et entretien de chaussées flexibles par le
recyclage à chaud des matériaux bitumineux in situ**

Auteurs : Janvier BASSENE

Mamadou GUEYE

Directeur : Mr. Soulèye DIOM, professeur à l'E.S.P.

Juillet 2007

Dédicaces

Janvier Bassène :

A

Ma très chère mère Mariama Diémé ;

Mon père Edouard Bassene ;

Mes frères et sœurs ;

Mon oncle Mamadou Diémé et sa famille ;

Mon oncle feu Raymond Bassene et sa famille

Ma chérie Pia Justine Sagna.

Mes amis Jean Malo, Simon Malo.

Tous mes camarades de la promotion 2007 GC-GEM.

Mamadou GUEYE :

A

Mes parents pour m'avoir toujours soutenu dans les études ;

Mes frères et sœurs ;

Tous mes camarades de la promotion 2007 GC-GEM.

Sommaire

Le but de ce présent projet est d'essayer de proposer aux pays de l'Afrique subsaharienne de nouvelles techniques d'entretien et de réhabilitation des chaussées souples par le recyclage des vieux enrobés sur place.

Les gisements naturels de granulats s'épuisent et il est de plus en plus difficiles d'en ouvrir de nouveaux. De plus, le coût des hydrocarbures devient de plus en plus élevé. Face à ces phénomènes il urge de penser à avoir recours à de nouvelles sources d'approvisionnement. Le recyclage des matériaux bitumineux est une solution à ce problème, qui présente des avantages tant sur le plan économique que sur le plan environnemental.

La démarche adoptée commence par une présentation générale des chaussées souples et des matériaux constituant leurs couches de roulement. Ensuite, il sera fait une description des différentes dégradations très souvent rencontrées sur les chaussées revêtues en indiquant leurs causes probables ainsi que leurs remèdes. Par la suite, l'ensemble des techniques de réutilisation des enrobés sera abordé de même que leur emploi dans l'entretien et le traitement des chaussées souples dégradées. La réhabilitation du tronçon Fatick - Kaolack mettra fin à ce rapport.

Les conclusions faites à l'issu de cette analyse permettront de dégager les avantages du recyclage dans tous les plans.

Remerciements

Nous aimerions exprimer notre reconnaissance en tout ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet. Il s'agit de :

- ❖ Mr Soulye DIOM enseignant au département génie civil de l' Ecole Polytechnique de Thiès, directeur du projet ;
- ❖ Mr Mamadou Lamine LO enseignant au département génie civil de l' Ecole Polytechnique de Thiès, responsable du laboratoire de matériaux ;
- ❖ Mr Amadou NIANG, du laboratoire de matériaux ;
- ❖ Mr Lamine CISSE, Chef du Bureau de Données Routières au sein de l'AATR, pour sa disponibilité et la documentation ;

Table des matières

<i>Dédicaces</i>	I
<i>Sommaire</i>	II
<i>Remerciements</i>	III
<i>Table des matières</i>	IV
<i>Liste des tableaux</i>	VIII
<i>Liste des figures</i>	IX
<i>Liste des abréviations et symboles</i>	X
INTRODUCTION	1
Chapitre I GÉNÉRALITÉS SUR LES CHAUSSÉES FLÉXIBLES	3
1.1. Structure d'une chaussée souple :	3
1.1.1. La couche de surface :	4
1.1.2. La couche d'assise	4
1.2. Principe de fonctionnement des chaussées souples :	5
1.3. Facteurs déterminants pour le dimensionnement des superstructures routières	6
1.3.1. L'influence du trafic	6
1.3.1.1. Poids des véhicules et charges admissibles par essieu	6
1.3.1.2. Efforts statiques verticaux	7
1.3.1.3. Efforts dynamiques	8
1.3.1.4. Notion de trafic pondéral équivalent	9
1.3.2. Influences locales	9
1.3.2.1. Effets des températures élevées	10
1.3.2.2. Conditions hydrologiques	10
1.3.3. Le sol d'infrastructure	10
Chapitre II LES MATÉRIAUX POUR COUCHE ROULEMENT	12
2.1. Généralités sur les enrobés bitumineux	13
2.2. Les constituants	13
2.2.1. Les granulats	13
2.2.1.1. Les granulats roulés	14
2.2.1.2. Les granulats concassés	14

2.2.1.3. Les caractéristiques des granulats pour couches de roulement.....	15
2.2.2. Les liants hydrocarbonés	17
2.2.2.1. Les goudrons	17
2.2.2.2. Les bitumes	18
2.2.2.3. L'asphalte.....	18
2.2.2.4. Caractéristiques des liants hydrocarbonés	19
2.2.2.5. Adhésivité aux granulats (affinité liant granulats).....	20
2.2.3. Les dopes d'adhésivité	22
Chapitre III GÉNÉRALITÉS SUR LES DÉGRADATIONS DES CHAUSSÉES	
FLÉXIBLES	24
3.1. Les types de dégradations des chaussées revêtues.....	24
3.1.1. Les dégradations de type A.....	24
3.1.1.1. Les déformations	25
3.1.1.1.1. Les ornières	25
3.1.1.1.2. Les Ondulations.....	26
3.1.1.1.3. Affaissement.....	27
3.1.1.2. Les fissures.....	28
3.1.1.2.1. Fissures longitudinales.....	28
3.1.1.2.2. Fissures en carrelage	28
3.1.1.2.3. Fissures en rive	29
3.1.1.2.4. Fissures transversales.....	29
3.1.1.2.5. Fissures latérales	30
3.1.1.2.6. Fissuration polygonale	30
3.1.1.2.7. Lézardes	31
3.1.2. Les dégradations de type B	34
3.1.2.1. Nid de poule	34
3.1.2.2. Flache.....	35
3.1.2.3. Bourrelet longitudinal	35
3.1.2.4. Pelade.....	35
3.1.2.5. Dentelles de rive.....	36
3.1.2.6. Ressuage	36
3.1.2.7. Arrachement ou déchaussement.....	36
3.1.2.8. Désenrobage	37

3.1.2.9. Les glissements de revêtements	37
3.2. Les facteurs influençant les dégradations des routes revêtues	38
3.2.1. Effets de la circulation	38
3.2.2. Effets de l'eau de surface	39
3.2.3. La qualité des matériaux	40
3.2.3.1. Les granulats	40
3.2.3.2. Le liant	40
3.2.4. La mise en œuvre	41
3.2.5. Envahissement par la végétation	41
3.2.6. Envahissement par le sable	41
3.2.7. Autres agents	42
Chapitre IV LES TECHNIQUES DE RECYCLAGE À CHAUD IN SITU DES ENROBÉS BITUMINEUX	43
4.1. Les techniques de régénération ou de réutilisation du béton bitumineux	43
4.1.1. Le rabotage et le fraisage à chaud	44
4.1.2. Le thermoreprofilage	44
4.1.3. La thermorégénération	45
4.1.4. Les huiles de régénération	47
4.2. Le recyclage en place	48
4.2.1. Etude détaillée du recyclage à chaud in situ (thermorecyclage)	49
4.2.2. Principes et Matériels	52
4.2.3. Les études de reconnaissance	52
4.2.4. Domaines d'emploi	53
4.2.5. Conditions de mise en œuvre et contrôles	54
4.2.6. Performances attendues	54
4.2.7. Avantages	55
4.2.8. Précaution et limite d'emploi	57
4.2.9. Devenir de la technique	57
Chapitre V UTILISATION DES MATÉRIAUX RECYCLÉS DANS L'ENTRETIEN DES CHAUSSÉES FLEXIBLES	59
5.1. Quelques types d'entretien	59
5.1.1. Entretien préventif	59
5.1.1.1. Généralités	59

5.1.1.2. Eléments d'un programme d'entretien préventif	61
5.1.1.2.1. La bonne chaussée	61
5.1.1.2.2. Le bon moment	62
5.1.1.2.3. Le bon traitement	62
5.1.2. Entretien courant	62
5.1.3. Entretien périodique	64
5.1.3.1. Point à temps	655
5.1.3.2. Réparation des dégradations de surface	65
5.1.3.3. Utilisation de matériaux enrobés	65
5.2. Utilisation des matériaux recyclés dans l'entretien	66
5.2.1. Description du procédé	67
5.2.2. Correction de la teneur en liant	67
Chapitre VI ÉTUDE DE CAS : TRONÇON FATICK-KAOLACK	69
6.1. Présentation du tronçon étudié	69
6.2. Description des essais réalisés sur le revêtement	69
6.2.1. L'essai Marshall	69
6.2.2. L'essai d'extraction	70
6.3. Résultats des essais réalisés sur le nouveau revêtement	71
6.4. Exploitation des résultats	73
CONCLUSION	74
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	75
ANNEXES	76

Liste des tableaux

<i>Tableau 5.1.</i> : Exigences granulométriques minimales	67
<i>Tableau 6.1.</i> : Critères de l'essai Marshall	70
<i>Tableau 6.2.</i> : Essai Marshall	71
<i>Tableau 6.3.</i> : Essai d'extraction	72
<i>Tableau 6.4.</i> : Comparaison des résultats des essais aux spécifications.....	73

Liste des figures

<i>Figure 1.1.</i> : Coupe transversale d'une chaussée souple	3
<i>Figure 1.2.</i> : fonctionnement d'une chaussée souple	6
<i>Figure 2.1.</i> : Désenrobage d'un gravillon en présence d'eau	21
<i>Figure 2.2.</i> : méthodes qui permettent d'améliorer l'affinité liant-granulat	22
<i>Figure 3.1.</i> : Fissures polygonales.....	31
<i>Figure 3.2.</i> : Lézardes	32
<i>Figure 3.3.</i> : Faïençage à mailles larges	33
<i>Figure 3.4.</i> : Faïençage généralisé.....	33
<i>Figure 4.1.</i> : schéma d'une machine de thermorégénération.....	46
<i>Figure 4.2.</i> : un chantier de thermorégénération.....	47
<i>Figure 4.3.</i> : schéma d'une machine de thermorégénération.....	48
<i>Figure 4.4.</i> : Chaîne de recyclage en place par thermoregénération en train de réhabiliter une chaussée municipale en une seule passe	50
<i>Figure 5.1.</i> : Avantages de l'entretien préventif pour la prolongation de la vie de la chaussée	61

Liste des abréviations et symboles

AASHO	:	American Association of State Highway Officials
ARRA	:	Asphalt Reclamation and Recycling Association
BB	:	Béton Bitumineux
BBDr	:	Béton Bitumineux Drainant
BBSG	:	Béton Bitumineux Semi Grenu
BBTM	:	Béton Bitumineux Très Mince
CAR	:	Chaussées Asphaltiques Récupérées
CBR	:	California Bearing Ratio
CPA	:	Coefficient de Polissage Accéléré
CPTP	:	Cahier des Prescriptions Techniques Particulières
EPC	:	Enrobé Préparé à Chaud
Km	:	kilomètre
ME	:	Module de compressibilité
TRS	:	Température de Ramollissement Superficiel
TSE	:	Tambour Sécheur Enrobeur
cm	:	centimètre
m	:	mètre
° C	:	Degré Celsius
%	:	Pourcentage

INTRODUCTION

Au fil des ans et sous l'effet du trafic, les couches de roulement des chaussées vieillissent, s'usent et perdent leurs qualités initiales occasionnant des déformations parmi lesquelles figurent l'orniérage, les fissures, les nids de poule ...

Ces phénomènes, mettent en cause la tenue générale de la chaussée et peuvent être dangereux pour l'utilisateur.

Pendant longtemps, la réparation des couches de roulement en béton bitumineux présentant des défauts de surfaces plus ou moins accentués avec déformation du profil en travers, a été réalisée par recouvrement au moyen d'une nouvelle couche plus épaisse de matériaux neufs. Cette technique présente l'inconvénient de surélever le niveau de la surface de la chaussée nécessitant ainsi l'exécution de travaux annexes relativement importants tels que :

- remise à niveau des glissières de sécurité et des accotements sur les grands itinéraires et les autoroutes ;
- relèvement des bordures, réparation des trottoirs, mise à niveau des regards d'assainissement sur les voies urbaines ;

Ces considérations, ajoutées aux raisons économiques de plus en plus pressantes (prix du bitume), ont entraîné l'apparition au cours des dernières années, de techniques nouvelles d'entretien et de réhabilitation connues sous les noms de thermorecyclage ou thermoprofilage ou thermorégénération qui sont déclinées sous le seul vocable de thermorecyclage ou recyclage en place à chaud.

Le procédé consiste généralement à réutiliser les anciennes couches de surfaces enrobées dont les caractéristiques se trouvent dégradées sous l'effet, soit du trafic, soit du vieillissement du bitume ou lorsqu'on observe un décollement de couches.

Deux systèmes permettent de recycler à chaud ces couches d'enrobés :

- Le traitement en central fixe ou mobile après démolition par fraisage des matériaux en place. L'enrobé, après avoir été fraisé, est transporté sur l'aire de stockage de la centrale où après granulation et criblage, les fraisats sont incorporés suivant un taux variable. La qualité du produit obtenu est identique à celui du produit neuf. Le taux de recyclage est de l'ordre de 10 à 25% pour les centrales traditionnelles et de 25 à 35% pour les centrales TSE (tambour, sécheur, enrobeur). Il est très important de mener

l'étude de formulation avec la plus grande rigueur possible afin d'optimiser la composition granulométrique du mélange et le dosage optimal en liant régénérant.

- Le traitement en place à l'aide d'ateliers multifonctions. On distingue les trois procédés vus précédemment :
 - Le *thermoreprofilage* consiste en une remise au profil d'une chaussée bitumineuse déformée ou avec des caractéristiques de surface médiocres, sans enlèvement de matériaux ni apport d'enrobés neufs.
 - La *thermorégénération* est une remise au profil d'une chaussée bitumineuse déformée ou avec des caractéristiques de surface médiocres, avec enlèvement des matériaux par chauffage scarification du revêtement sur une épaisseur plus importante et mise en place d'une couche d'enrobés neufs.
 - Le *thermorecyclage* consiste à recycler les enrobés en place par chauffage, scarification du revêtement, malaxage avec les apports et les correctifs nécessaires et remise en œuvre du mélange. C'est le seul procédé qui permet de réutiliser totalement l'enrobé vieilli. Les matériels utilisés aujourd'hui sont très performants et permettent de traiter tous les types d'enrobés et ce, avec de bons résultats.

Le projet qui porte sur la réhabilitation des chaussées souples par les techniques de recyclage à chaud in situ que nous avons défini précédemment sera réparti en six chapitres.

- Le premier porte sur les généralités sur les chaussées souples : dans ce chapitre, on traitera de la structure, du principe de fonctionnement et des facteurs influençant le dimensionnement de ce type de chaussées.
- Le deuxième chapitre traite des matériaux pour couche de roulement : dans cette partie il sera question de parler de l'ensemble des matériaux entrant dans la composition des couches de roulement et de leurs caractéristiques.
- Le troisième chapitre s'orientera vers les dégradations des chaussées bitumineuses.
- Le quatrième chapitre porte sur les techniques de recyclage à chaud in situ : l'ensemble des techniques de réutilisation du vieux asphalte y seront décrites ainsi que leurs avantages et limites.
- Le cinquième chapitre décrit l'utilisation des matériaux recyclés dans l'entretien des chaussées bitumineuses.
- Enfin le sixième chapitre porte sur une étude de cas : le tronçon Fatick - Kaolack.

Chapitre I GÉNÉRALITÉS SUR LES CHAUSSÉES FLÉXIBLES

Le rôle principal d'une assise de chaussée est la répartition latérale des contraintes dues à des charges roulantes en surfaces afin de les amener à des niveaux compatibles avec les caractéristiques mécaniques du sol naturel.

Les chaussées dites souples sont des chaussées à revêtement hydrocarboné dont les couches de fondation et de base sont en matériaux granulaires non traités. La construction des chaussées souples requiert la mise en œuvre de deux à trois couches de matériaux différents dont la qualité augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de la surface (module d'élasticité croissant du bas vers le haut).

La durée de vie des chaussées flexibles est généralement de l'ordre de 15 à 20 ans. Les épaisseurs et les types de matériaux à utiliser sont établis en fonction de la classe de route à construire, du trafic, des sols en place et des conditions climatiques particulières.

Le présent chapitre traite successivement de la structure des chaussées souples, de leur principe de fonctionnement et des facteurs entrant dans leur dimensionnement.

1.1. Structure d'une chaussée souple :

Une chaussée est constituée par différentes couches qui sont en partant du dessus :

- La couche de surface ;
- La couche de base ;
- La couche fondation ;
- Et éventuellement la sous-couche.

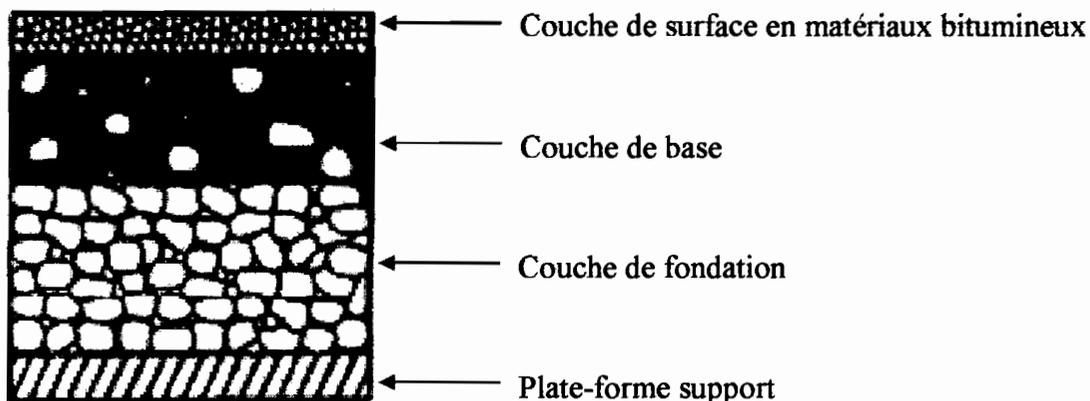


Figure 1.1. : Coupe transversale d'une chaussée souple.

1.1.1. La couche de surface :

Elle a généralement une structure bicouche, avec :

- La couche de roulement, qui est la couche supérieure, sur laquelle s'appliquent directement les actions du trafic et du climat.
- La couche de liaison : son apport structurel est secondaire (sauf pour les chaussées à assise granulaire, la couche de surface est la seule couche liée) ; elle est plutôt tributaire de la pérennité de la chaussée et doit satisfaire à quatre objectifs principaux :
 - La sécurité et le confort des usagers, qui dépendent directement des caractéristiques de surface ;
 - Le maintien de l'intégrité de la structure, par la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations des eaux pluviales et des divers polluants susceptibles d'être répandus en surface ;
 - L'impact sur l'environnement, qui consiste essentiellement en la réduction des bruits de roulement ;
 - Les possibilités de régénération des caractéristiques de surface.

Proches de la surface, ces deux couches sont réalisées avec des matériaux élaborés leur permettant de résister aux sollicitations mécaniques relativement élevées.

1.1.2. La couche d'assise :

L'assise de chaussée se décompose en deux sous-couches : la couche de fondation et la couche de base.

Ces couches apportent à la chaussée la résistance mécanique nécessaire pour reprendre les charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur le sol support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles. Elles permettent aussi de neutraliser les effets négatifs des agents atmosphériques.

Habituellement, les matériaux utilisés en couche de fondation ne sont pas traités aux liants. On se contente souvent d'un graveleux latéritique cru.

La mise en place quant à elle, requiert des précautions particulières pour éviter que les camions et engins du chantier ne défoncent le sol d'infrastructure. C'est pourquoi on procède à une technique de pose dite à l'avancement.

L'approvisionnement sur le site est fait par camions-bennes. Le régalaage est assuré soit par un bulldozer, un chargeur ou dans certains cas par une niveleuse.

Les conditions de mise en place (humidité) sont définies par l'essai Proctor modifié. L'arrosage peut se faire à la centrale sur l'aire de stockage du matériau, à la carrière si un dispositif de malaxage est disponible. Sinon cette opération est exécutée sur le site même avec des camions-citernes équipés de rampes d'arrosage.

Le compactage est effectué avec des rouleaux vibrants lisses et/ou des rouleaux à pneus. La finition se fait avec un rouleau lisse.

En cas d'arrosage sur le site, une période d'attente peut être nécessaire pour atteindre par séchage et infiltration les conditions optimales d'humidité.

Le contrôle se fera par mesure de la densité in situ et par levé altimétrique. Les tolérances sont fixées par le CPTP. A titre indicatif, précision de ± 20 mm sur 4m selon une pente transversale parallèle à la future surface de roulement.

La couche de base doit être réalisée avec un matériau de portance sensiblement supérieure à celle de fondation. Parmi les matériaux mis en œuvre en couche de base dans nos chaussées on peut citer la latérite stabilisée au ciment, la latérite stabilisée mécaniquement, les concassés tout-venant de basalte, de calcaire, la grave-bitume, la grave-ciment et le sol-ciment. Pour des routes faiblement circulées, on peut utiliser également des matériaux non traités.

Remarque : couche de forme

Bien que ne faisant pas partie de la chaussée proprement dite, elle participe à son intégrité de par ses fonctions :

- Pendant les travaux, elle contribue au nivellement et assure la traficabilité du chantier ;
- Elle permet d'homogénéiser les caractéristiques du sol support et le protège, notamment contre le gel.

1.2. Principe de fonctionnement des chaussées souples :

Leur fonctionnement peut être schématisé comme indiqué (*figure 1.2*).

Les chaussées souples comportent une couverture bitumineuse mince (moins de 15cm), parfois réduite à un simple enduit superficiel, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30 et 60cm.

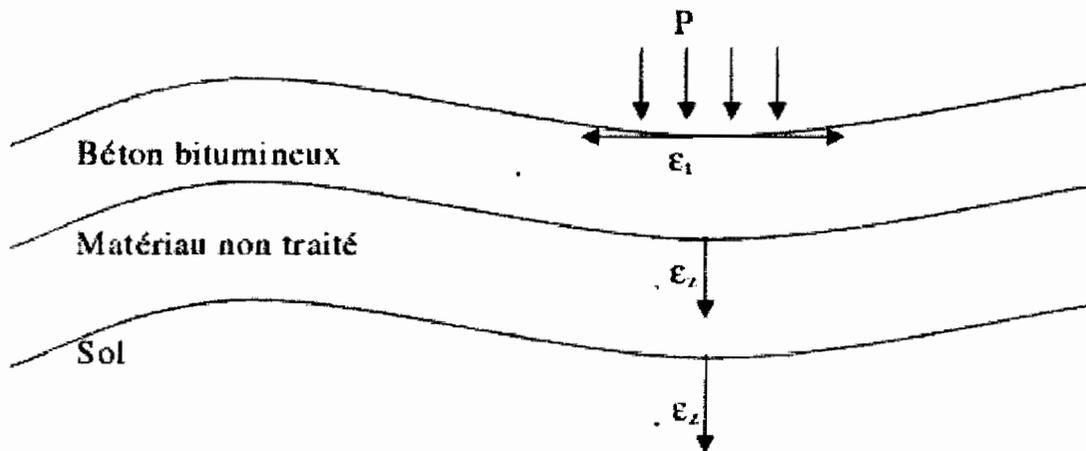


Figure 1.2. : fonctionnement d'une chaussée souple.

Les matériaux granulaires constituant l'assise de la chaussée ont un module de rigidité relativement faible. Comme la couverture bitumineuse est mince, les efforts verticaux sont transmis au support avec une faible diffusion. Les contraintes verticales élevées engendrent par leur répétition des déformations plastiques qui se répercutent en déformations permanentes à la surface de la chaussée.

La couverture bitumineuse subit à la base des efforts répétés de traction-flexion. L'évolution la plus fréquente des chaussées souples se manifeste par l'apparition de déformations de type orniérage et affaissement qui détériorent les qualités des profils en travers et en long.

Les sollicitations répétées de flexion alternée dans la couverture bitumineuse entraînent une détérioration par fatigue, sous la forme de fissures d'abord isolées, puis évoluant peu à peu vers le faïençage.

1.3. Facteurs déterminants pour le dimensionnement des superstructures routières :

1.3.1. L'influence du trafic :

1.3.1.1. Poids des véhicules et charges admissibles par essieu :

Le poids des véhicules et sa répartition sur les essieux sont deux éléments déterminants pour le dimensionnement de la superstructure.

La législation relative à la circulation routière fixe le poids maximum des véhicules autorisés à circuler dans chaque pays.

L'indication du poids maximum total des véhicules n'est toutefois pas une notion suffisamment précise pour déterminer la sollicitation des routes. C'est la charge maximum

autorisée par essieu qui nous intéresse en premier lieu, la charge par roue simple ou jumelée étant alors la moitié de cette charge par essieu. Cette charge limite varie d'un pays à l'autre.

France	:	14.5 t (13 t + surcharge admise 1.5 t)
Hollande	:	8 t
Etats-Unis	:	8.16 t
Suisse	:	10 t
Sénégal	:	13 t

Dans chaque pays, une législation spéciale est par ailleurs utilisée pour les transports routiers exceptionnels, réservés essentiellement au transport de marchandises lourdes, indivisibles et dont les dimensions ne permettent pas un transport par chemin de fer.

Ces transports exceptionnels provoquent des sollicitations très importantes sur les chaussées. Ils sont par définition assez peu fréquents (1 à 2 fois par an sur un itinéraire donné), et ne peuvent être effectués qu'avec autorisation spéciale sur des routes en bon état, à faible vitesse (10 à 20 km/h) et à des périodes climatiques favorables (hors des périodes de très forte température). Dans ces conditions on peut dire qu'ils ne provoquent pas une réduction sensible de la durée de vie d'une chaussée dimensionnée pour un trafic lourd important.

En résumé la charge maximum par essieu autorisée pour les poids lourds sera, avec la fréquence de passage de cette charge, déterminante pour le dimensionnement de la superstructure.

1.3.1.2. Efforts statiques verticaux :

La roue d'un véhicule immobile exerce sur la chaussée un effort vertical, réparti sur toute la surface de contact du pneu. Cette surface de contact dépendra donc à la fois de la charge de la roue et de la pression de gonflage du pneumatique. La forme de l'empreinte est celle d'une ellipse quasi rectangulaire, mais peut être assimilée à un cercle de rayon **a**.

La pression unitaire que le pneu exerce sur la chaussée est légèrement supérieure à la pression de gonflage, en raison de la rigidité de la carcasse du pneu. Sur la base d'essais effectués avec un grand nombre de types de pneus, on a constaté une augmentation de cette pression d'une valeur toujours inférieure ou égale à $r = 10\%$.

Pressions de gonflage moyennes :

- Voiture de tourisme : ≤ 2 bar
- Poids lourds : max. 8 bar

1.3.1.3. Efforts dynamiques :

L'effort statique vertical indiqué ci-dessus augmente de façon sensible, lorsque le véhicule est en mouvement, pour les raisons suivantes :

- a. dans les virages, la surcharge des roues extérieures augmente sous l'effet de la force centrifuge ;
- b. sous l'effet d'un vent transversal, la surcharge peut également augmenter du côté du véhicule à l'abri du vent ;
- c. lors du freinage ou de l'accélération du véhicule, la surcharge de l'essieu avant, respectivement arrière augmente ;
- d. les défauts de la surface de roulement entraînent des oscillations dans les essieux qui ne sont que partiellement amorties par le système de suspension du véhicule. Il en résulte une augmentation brève et répétée de la surcharge.

Les causes a, b et c engendrent une majoration assez bien quantifiable des charges statiques dont l'ordre de grandeur est d'environ 15 à 20%.

Il est par contre très difficile de traduire mathématiquement les effets des oscillations dues aux imperfections de la surface de la chaussée. En particulier dans le cas des revêtements hydrocarbonés, le comportement visco-élastique des couches de la superstructure complique considérablement le problème. En effet, les déformations dues aux charges sont dans ce cas en partie réversibles et en partie irréversibles. L'amplitude des oscillations dépend alors essentiellement des trois facteurs suivants :

- importance de la charge (profondeur des déformations) ;
- durée de l'application (proportion des déformations irréversibles) ;
- fréquence des passages (durée des temps de repos durant lesquels les déformations réversibles disparaissent).

Lors de l'accélération ou du freinage d'un véhicule, des efforts tangentiels prennent naissance au niveau de la surface de roulement. La valeur de ces efforts horizontaux est égale à la pression de contact pneu-chaussée multipliée par le coefficient d'adhérence f ($f = 0.5$ à 0.9 sur route sèche).

Des efforts de cisaillement transversaux analogues existent également en circulation à vitesse constante. Ils peuvent être engendrés par les effets de la force centrifuge en virage, par un vent transversal, par dérapage du véhicule et par oscillations verticales des roues constatés précédemment (le couple moteur n'étant plus complètement absorbé par l'adhérence).

Des efforts de cisaillement dits de reptation viennent encore s'ajouter. Ils sont provoqués par l'affaissement du pneu sous l'effet des charges. Ces efforts longitudinaux, dirigés selon le sens de la marche au centre de l'empreinte du pneu et selon le sens contraire à la périphérie, ont une résultante nulle, mais provoquent à la fois une usure du pneu et de la chaussée.

Tous ces cisaillements tangentiels sont la cause d'une usure de la surface du revêtement. Il peut en résulter dans des cas extrêmes un arrachement de la surface, une fissuration superficielle ou des vagues appelées tôle ondulée.

1.3.1.4. Notion de trafic pondéral équivalent :

Alors que dans le cas d'une charge statique les contraintes provoquées sur le revêtement sont pour une surface de contact constante, directement proportionnelles à la charge par essieu, elles augmentent très rapidement dans le cas d'un véhicule en mouvement et ne sont plus proportionnelles à la charge par essieu. Cette augmentation est essentiellement due aux majorations dynamiques et au comportement visco-élastique de la superstructure. Ce phénomène peut être quantifié par des essais en grandeur nature.

La vitesse des véhicules, c'est-à-dire la durée d'application de la charge, joue également un rôle important. Plus la vitesse augmente, plus les déformations diminuent. Ainsi les essais AASHO montrent dans le cas d'une route à revêtement souple que la déflexion due à une roue passant à 60 km/h est environ égale à la moitié de la déflexion résultant de la même roue à l'arrêt.

1.3.2. Influences locales :

L'examen des dégradations des chaussées a montré que les conditions météorologiques du lieu et des environs où la route est construite avaient une influence importante sur le comportement de la superstructure.

L'étude détaillée de ces dégradations permet de constater que dans le cas des superstructures souples, l'action des agents atmosphériques est dans de nombreux cas la

source de dégâts considérables. Le climat et l'hydrologie devront donc être soigneusement pris en considération lors du dimensionnement des chaussées souples.

1.3.2.1. Effets des températures élevées :

En été, sous l'effet des températures diverses élevées, des conditions critiques peuvent également se manifester. Elles résultent des phénomènes suivants :

- abaissement des contraintes admissibles dans les revêtements hydrocarbonés à haute température ;
- accroissement des contraintes de traction sous l'effet de la dilatation des couches supérieures ;
- moins bonne résistance du revêtement au cisaillement.

Ces facteurs relèvent essentiellement de la technologie des couches hydrocarbonées et pendant le dimensionnement ne sont pris en compte que dans le choix des matériaux constituant les différentes couches.

1.3.2.2. Conditions hydrologiques :

Les conditions hydrologiques peuvent être défavorables à la superstructure dans les cas suivants :

- la route est en tranchée profonde ;
- des eaux interstitielles pénètrent dans le corps de la superstructure ;
- les eaux de ruissellement peuvent provoquer une érosion de la superstructure.

Lors du dimensionnement, il faudra prendre des mesures préventives contre les dégâts éventuels.

1.3.3. Le sol d'infrastructure :

La plate-forme support est constituée du sol naturel terrassé (sol support) et d'une couche de forme. Son rôle pendant les travaux, est d'assurer un nivellement permettant la circulation des engins et de protéger le sol support contre l'agression de ces derniers. Par rapport au fonctionnement de la chaussée en service, cette couche assure une homogénéisation des caractéristiques mécaniques dans le cas d'une dispersion dans le sol support et/ou le remblai.

Le sol d'infrastructure est aussi appelé sol d'assise : il supporte l'assise de la chaussée.

La propriété fondamentale du sol d'assise qui influence le comportement de la superstructure dans les pays tropicaux est sa portance. Cette propriété intervient donc dans le dimensionnement et l'exécution de la superstructure routière.

La portance d'un sol peut être définie comme la capacité à supporter des charges en service sans qu'il en résulte des tassements excessifs. Elle dépend de sa résistance au cisaillement.

Dans le cadre du dimensionnement d'une superstructure routière, une insuffisance du sol d'assise exigera les mesures suivantes :

- soit améliorer la portance du sol en augmentant sa résistance au cisaillement par compactage ou par stabilisation ;
- soit augmenter l'épaisseur de la superstructure afin d'obtenir une meilleure répartition des charges et de diminuer ainsi les sollicitations sur le sol d'assise.

Pour caractériser la portance d'un sol, les modules ou indices suivants, obtenus par des essais de charge standard sur la forme d'infrastructure ou sur des échantillons prélevés dans son sol sont utilisés :

- module de compressibilité ME ;
- indice californien CBR (California Bearing Ratio);

Selon les cas particuliers, c'est l'un ou l'autre de ces modules qui sera utilisé pour le dimensionnement.

Dans la suite nous parlerons des matériaux utilisés dans la couche de roulement de ces types de chaussées.

Chapitre II LES MATÉRIAUX POUR COUCHE ROULEMENT

La couche de roulement est la couche supérieure d'une chaussée. C'est elle qui est en contact direct avec les véhicules. Elle doit donc offrir des conditions convenables de sécurité et de confort compatibles avec la classe et le niveau de service de l'itinéraire considéré.

La couche de roulement est également une couche de chaussée qui subit des actions qui lui sont directement appliqués par des agents extérieurs tels que la météorologie, les pneus à crampons, etc. ; et elle participe en outre au travail d'ensemble de la structure de la chaussée.

Elle représente donc le but ultime de la technique routière en matière de chaussée, et les autres couches n'ont de justification que si elles permettent à cette couche de roulement de jouer son rôle convenablement.

Elle joue plusieurs rôles :

- Premier rôle : la sécurité

La couche de roulement doit posséder de bonnes propriétés antidérapantes, c'est-à-dire une bonne rugosité. Cette rugosité doit être d'autant meilleure que la vitesse est élevée.

- Deuxième rôle : le confort

Le confort pour un usager, consiste, en particulier, à ne pas ressentir dans son véhicule des secousses brutales ou des vibrations excessives. Deux facteurs principaux conditionnent ce confort : la suspension des véhicules d'une part, l'uni de la chaussée d'autre part, le mauvais uni pouvant d'ailleurs entraîner une perte d'adhérence ou rendre la chaussée trop bruyante.

- Troisième rôle : la participation à la structure par la protection des assises de chaussées

Il intéresse plus particulièrement l'ingénieur routier car :

- la couche de roulement subit directement les agressions du trafic et celles liées aux conditions climatiques ;
- elle doit également faire obstacle à la pénétration d'eau dans les assises de chaussées qui peut entraîner la destruction de la liaison entre couches à l'interface base/roulement et même désorganiser la couche de base elle-même.

La couche de roulement doit, de plus, assurer ces différents rôles de manière durable. Sa qualité doit donc rester convenable, malgré les répétitions des sollicitations entre les renouvellements intervenant au titre de l'entretien.

De nos jours la plupart des revêtements sont en enduits superficiels ou en enrobés (enrobés

denses, bétons bitumineux).

Ce chapitre portera sur l'étude des matériaux qui composent la couche de roulement.

2.1. Généralités sur les enrobés bitumineux :

L'enrobé bitumineux est un mélange dans une proportion choisie de granulats et de liant hydrocarboné. Dans ce mélange, le liant hydrocarboné est principalement responsable de la liaison entre les granulats tandis que le squelette minéral constitué par les granulats assure la rigidité de l'ensemble.

Les enrobés hydrocarbonés employés en couche de roulement des chaussées doivent, par leurs propriétés, répondre du mieux possible aux problèmes qui sont posés par le trafic et la circulation en général, et par les contraintes que leur imposent le climat et l'exploitation du réseau.

Le revêtement c'est-à-dire l'enduit superficiel qui est le plus répandu sur le réseau routier joue un rôle important sur la durée de vie de la chaussée. Bien formulé et mis en œuvre, l'enduit superficiel doit assurer deux fonctions principales qui sont :

- ✦ la rugosité pour assurer la sécurité des usagers ;
- ✦ l'étanchéité afin d'empêcher l'infiltration des eaux superficielles, il est fondamental pour la pérennité de la chaussée que les couches inférieures soient strictement à l'abri des eaux de ruissellements.

2.2. Les constituants :

Les principaux constituants d'un enrobé sont :

- ✦ les granulats ;
- ✦ le liant hydrocarboné ;
- ✦ éventuellement le dope.

2.2.1. Les granulats :

Les granulats utilisés dans les enrobés en couche de roulement jouent un rôle de première importance dans le phénomène d'adhérence pneu-chaussée. Sous l'effet de la circulation, les granulats en surface tendent à se polir plus ou moins rapidement selon leur nature et leur composition minéralogique. À court ou à moyen terme, selon la densité du trafic, la chaussée peut devenir glissante.

La construction routière exige la mise en œuvre de quantités considérables de matériaux de qualité. Par exemple la couche de revêtement d'un kilomètre d'une route de 7.20

m de large et d'épaisseur 5 cm requiert pas moins de 320m³ de matériaux pierreux, soit le contenu de 30 camions de 16m³. Par ailleurs, les travaux routiers sont en concurrence avec les autres types de constructions (bâtiment, hydraulique, transport d'énergie électrique, etc.) pour le recours aux matériaux pierreux.

Sur un autre registre, il est important de souligner que des problèmes d'environnement réduisent les possibilités d'exploitation des sites de matériaux existants. Enfin avec l'augmentation des coûts de transport, l'on se tourne de plus en plus vers des solutions du type amélioration de matériaux médiocres, matériaux trouvés sur place.

2.2.1.1. Les granulats roulés :

L'élaboration des granulats de roches meubles, familièrement appelés granulats roulés ne nécessite pas l'emploi d'explosifs et très peu de concassage. Par contre, leur lavage pour les débarrasser de la gangue argileuse qui les enrobe est une opération essentielle. Exploités en gravière ou par dragage, ces matériaux sont ainsi appelés à cause des effets du transport solide, du charriage sur la forme des grains. A l'état brut, ils sont également appelés tout-venant. A défaut d'être utilisés à l'état brut, ils font l'objet d'un traitement qui se résume souvent à un écrêtement, i.e. à une élimination des gros éléments, selon les dispositions arrêtées par le cahier de charge.

Le tout-venant peut être aussi criblé et séparé en plusieurs fractions dans une station de criblage. Ces fractions sont alors prêtes à l'emploi soit seules, soit sous forme de mélange à granulométrie étendue. Si les gros éléments séparés par écrêtement sont soumis à un concassage et réincorporés au matériau restant, on obtient alors un matériau dit semi concassé.

Ces gros éléments peuvent également être utilisés séparément comme moellons pour la construction des perrés de protection par exemple, ou tout simplement comme enrochements.

2.2.1.2. Les granulats concassés :

Pour produire des éléments de la dimension de graviers ou des sables, les blocs résultant de l'abattage à l'explosif des pans de massifs rocheux sont traités dans une station de concassage et de criblage. Selon le niveau atteint dans le processus de traitement, différents produits peuvent être obtenus. Dans le cas où le processus est limité uniquement au concassage primaire permettant de réduire les gros blocs, sans criblage, le produit brut obtenu est appelé tout-venant de concassage. Dans le cas d'un processus plus élaboré, on obtient des

matériaux concassés granulés livrés en plusieurs fractions bien définis du point de vue granulométrique.

Les différentes étapes d'un tel processus sont les suivantes :

- ✦ concassage primaire et criblage primaire pour séparation des gros éléments ;
- ✦ concassage et criblage secondaire des éléments inférieurs à 50mm ;
- ✦ concassage tertiaire pour obtenir tous les calibres de grains ;
- ✦ broyage d'une partie des granulats pour obtenir des gravillons fins et du sable ;
- ✦ reconstitution éventuelle d'une granulométrie continue dans une station de criblage.

Le concassage primaire est généralement effectué à l'aide de concasseurs à mâchoires ou bien avec des giratoires. Pour le concassage secondaire, on utilise habituellement des concasseurs à marteaux ou percussion. Le broyage s'effectue par des broyeurs à cylindres ou des moulins à barres.

Le criblage peut être effectué par différents procédés. Le but du criblage est essentiellement de fractionner le produit de concassage. Il peut être également utilisé aux différents étages de concassage pour éliminer les éléments trop gros ou le sable excédentaire.

En dehors du criblage, il existe un autre type de traitement qui est d'une importance particulière pour les granulats entrant dans la fabrication des bétons bitumineux ou à liant hydraulique : le lavage. Il permet d'éliminer tout matériau pouvant contaminer le granulat (fines particules argileuses pouvant coller aux grains) et, par la même occasion, contrôler la teneur en fines à réincorporer éventuellement. Les méthodes de lavage habituellement utilisées sont : l'arrosage par jets durant le criblage et la décantation dans des bacs pour la fraction sableuse.

2.2.1.3. Les caractéristiques des granulats pour couches de roulement :

Compte tenu de leur position à la surface de la chaussée, au contact direct des pneumatiques et des intempéries, toutes les qualités mécaniques du granulat entrent en ligne de compte. Ces qualités sont de deux ordres :

- ✦ celles qui tiennent à la nature de la roche d'origine (dureté, résistance au polissage, résistance aux chocs) ;
- ✦ celles qui résultent de la fabrication des granulats (propreté, forme, granularité, angularité, homogénéité).

La dureté est définie par les essais Los Angeles et Micro-Deval humide.

La résistance au polissage est définie par un essai normalisé de polissage accéléré.

La résistance aux chocs est appréciée par l'essai de fragmentation dynamique.

La propreté est le pourcentage de fines (<0.5mm) contenu dans et sur les granulats.

Si les conditions de propreté ne sont pas suffisantes, il faudra procéder soit à un dépoussiérage à sec, soit à un lavage, soit à un traitement particulier.

La forme des granulats est définie par la grosseur et l'épaisseur. La forme est considérée comme satisfaisante lorsque le rapport G/E est inférieur à 1.58. Pour les enduits superficiels, les granularités couramment employées sont : 10/14 ; 6.3/10 et 4/6.3 (au Sénégal, les cribles permettent d'avoir du 0/3, 3/8, 8/16).

L'angularité est la proportion de granulats à arêtes vives. Dans le cas de matériaux alluvionnaires, on admet que, pour avoir une angularité suffisante, on concasse les matériaux primaires au-delà de 4D, D étant la valeur supérieure de la classe considérée (pour obtenir un bon 6/10 on doit concasser au dessus de 40, sinon trop peu d'éléments présenteraient des arêtes vives) : les granulats ne remplissant pas les conditions doivent être exclus des chantiers sur route à trafic élevé.

L'homogénéité permet d'obtenir des granulats ayant des qualités semblables. Pour la fabrication des enduits superficiels, il convient d'éliminer les roches non homogènes qui donnent après concassage des granulats de natures pétrographiques différentes dont une partie, de qualité inférieure aux autres, amènera une certaine pollution pour l'ensemble de la fabrication.

Les différentes qualités des granulats entrent bien sûr en ligne de compte quelle que soit la technique utilisée en couche de roulement. Pour les enduits superficiels en particulier, la propreté et la forme revêtent une importance primordiale ; elles conditionnent en effet le collage du granulat par le liant et le dosage ainsi que la bonne tenue du granulat (une plaquette par exemple aura tendance à casser sous la charge).

Pour les enrobés, la granularité du squelette minimal est définie par les dimensions extérieures des éléments qui la composent. On utilise généralement des granularités 0/6 ; 0/10 ; 0/14. La granularité peut être :

- ✦ grenue : ce qui correspond à un mélange riche en gravillons et pauvre en sable ;
- ✦ semi-grenue, là où le dosage gravillon-sable est particulièrement étudié et correspond au mélange le plus couramment utilisé dans les formules actuelles ;
- ✦ discontinue, lorsqu'on supprime une des fractions granulaires du mélange, en général petit gravillon ;

- ✚ continue lorsque toutes les fractions granulaires sont présentes. Cette granularité tend à disparaître au profit des courbes discontinues, en particulier dans la formulation des enrobés appliqués en couche mince.

2.2.2. Les liants hydrocarbonés :

Les liants hydrocarbonés jouent un rôle fondamental dans la durabilité d'un revêtement routier : leurs caractéristiques intrinsèques assurent flexibilité et résistance à la fissuration, à la fatigue et à l'arrachement des enrobés.

Les liants hydrocarbonés utilisés pour les chaussées à revêtement souple sont :

2.2.2.1. Les goudrons :

C'est un liquide noir et visqueux, de composition chimique très complexe : mélange de carbures d'hydrogène (benzols, phénols, anthracène) et de carbone en fines particules. Ils contiennent des hydrocarbures non saturés, dérivés du benzène ; traités à l'acide sulfurique bouillant, ils donnent des produits de sulfonation.

Le goudron brut provient en général de houille distillée à haute température ($1000 < T < 1300^{\circ}\text{C}$) ; il y a toutefois des goudrons de moyenne température ($T=800^{\circ}\text{C}$) et de basse température ($T=600^{\circ}\text{C}$).

Les goudrons routiers (ou goudrons reconstitués) sont reconstitués à partir de brais (produits issus de la distillation de goudron de houille pour en tirer des huiles ce qui donne un résidu résineux) et d'huiles épurées de viscosités différentes afin de fluidifier le liant et le rendre facilement utilisable par un chauffage approprié. Ces huiles sont destinées à faciliter la mise en œuvre et à offrir la souplesse, la cohésion et l'adhérence au liant et pour que ce dernier ne ressue pas par temps chaud et ne devienne pas cassant et fragile par temps froid.

On distingue deux catégories de goudrons :

- ✚ les goudrons à vieillissement normal qui sont plus fluides.
- ✚ les goudrons à vieillissement lent, appelés goudrons T.R.S. (Température de Ramollissement Superficiel).

Les goudrons les plus fluides sont utilisés pour l'imperméabilisation par imprégnation ; puis viennent les goudrons destinés aux épandages superficiels par période normale. Des goudrons plus visqueux sont utilisés pour épandage superficiel par temps chaud ou pour les enrobages (enduits d'usure pour chaussée à forte circulation).

Les goudrons les plus visqueux sont uniquement destinés aux enrobages d'agrégats destinés à être agglomérés par compactage sur le chantier routier.

D'origine houillère, ils étaient utilisés en lieu et place du bitume, avant que l'on ne prenne conscience qu'ils étaient cancérogènes.

2.2.2.2. Les bitumes :

Les bitumes utilisés dans les enrobés confèrent des propriétés visco-élastiques aux revêtements de chaussées. Un bitume ayant les caractéristiques appropriées assure des performances élevées sur le plan de la résistance à l'orniérage, à la fissuration thermique, à la fissuration de fatigue et à l'arrachement; ces caractéristiques contribuent à la réalisation de revêtements sécuritaires, durables et économiques.

Les bitumes sont des corps noirs, solides ou liquides visqueux à température ambiante, les bitumes sont des ensembles très complexes d'hydrocarbures aliphatiques, naphéniques et aromatiques. Très globalement on y rencontre des asphaltènes (solides) en solution dans des matières liquides. Les maltènes (huiles pétrolières) sont composées d'huiles saturées, d'huiles aromatiques et de résines.

La densité des bitumes à 20°C est voisine de 1. Ils existent dans la nature mais résultent de la distillation fractionnée de certains pétroles bruts dits « bruts à bitume ».

Ils sont employés pour la fabrication des mélanges bitumineux :

- ✚ Purs à chaud (160 à 180°C) pour la fabrication des graves bitumes, sables bitumes, enrobés divers et bétons bitumineux ;
- ✚ Fluidifiés par addition de produits pétroliers plus légers qui disparaissent par évaporation (fréquent pour les enduits) ;
- ✚ Fluxés par addition d'huile de goudron qui joue le même rôle que les produits de fluidification en plus de l'adhésivité aux granulats ;
- ✚ Sous forme d'émulsion (enrobé à froid).

2.2.2.3. L'asphalte :

L'asphalte est un mélange de bitume et de granulats. C'est un matériau « fermé » (il n'y a aucun vide).

À l'état naturel, c'est un mélange de bitume et de roche calcaire. Sous l'effet de la compression de ces deux matériaux, au cours du temps, par les couches supérieures, le calcaire est imprégné à cœur par le bitume (environ 12% de bitume). Cette roche est actuellement

exploitée sous forme de poudre que l'on incorpore à d'autres formules. On le trouve dans des mines ou même affleurant à la surface.

2.2.2.4. Caractéristiques des liants hydrocarbonés :

Viscosité :

On distingue deux sortes de viscosité : cinématique et dynamique. La viscosité cinématique est mesurée par le temps mis pour le passage d'un fluide au travers d'un orifice de calibre déterminé, elle est transcrite en Stokes. Elle s'obtient aussi en divisant la viscosité dynamique par sa masse spécifique :

$$v = \frac{\eta}{\rho}$$

Susceptibilité :

C'est la caractéristique qui marque l'aptitude d'un liant hydrocarboné à varier plus ou moins de consistance pour une variation déterminée de la température.

Cohésivité et ductilité :

La cohésivité d'un liant hydrocarboné est caractérisée par sa résistance à la rupture, principalement par cisaillement ou par traction et ceci dans des conditions de vitesse de déformation par allongement ou cisaillement déterminées; ou encore dans des conditions de mise en charge fixées. Il s'agit donc de liants reconstitués par des solides demi-mous ou plus ou moins durs et non pas de liquide visqueux.

La cohésivité est fonction de la viscosité et croit avec celle-ci. Ceci n'est exact que quand le liant n'atteint pas un certain stade de dureté ou de fragilité. En surface ce sont les fissures non parallèles à la direction de l'effort qui facilitent la décohésion par fragilité ou par déchirement.

Pour un corps de dureté ou de fragilité déterminée, l'aptitude à la décohésion est fonction de la vitesse de déformation ou plus exactement de la vitesse de mise en charge. Tout corps peut se comporter comme un corps fragile si la vitesse de mise en charge est portée à une valeur suffisamment grande.

La cohésivité correspond à la rupture du liant dans sa masse sous certaines natures d'efforts. Cette rupture dans la masse s'oppose au décollement du liant de la paroi des corps (agrégats) que ce liant est chargé d'agglutiner.

Ainsi la cohésivité qui, est fonction de la viscosité du liant, s'examine sous l'angle de la ductilité. Cette dernière est en somme l'aptitude au fluage d'un liant dans des conditions fixées. Un liant est ductile, à une certaine vitesse de déformation, lorsqu'il peut être étiré à cette vitesse et à une certaine température sans se rompre.

2.2.2.5. Adhésivité aux granulats (affinité liant granulats) :

Beaucoup de revêtements sont défailants par suite d'une adhésivité du liant inférieure à celle de l'eau, ce qui se manifeste quand l'eau reste en contact prolongé avec ce revêtement. L'adhésivité au sens général, est l'effort qu'il convient d'exercer uniformément sur l'unité de surface d'un enduit pour le détacher de son support ; l'adhésivité a la dimension donc d'une contrainte.

Au sens physique, l'adhésivité représente pour un liant ayant mouillé un minéral, la faculté de ce liant de résister au déplacement ou au décollement sous l'effet de possibles actions extérieures. Si la cohésivité ou pouvoir de cohésion, dépend surtout de la viscosité du liant, l'adhésivité ou le pouvoir d'adhésion est une question d'interface ; ce qui engendre une étroite relation entre l'adhésivité et le mouillage.

L'adhésivité est donc une caractéristique d'affinité d'un corps pour un autre. Pour que cette affinité d'ordre moléculaire puisse se manifester, il faut que l'un des corps soit suffisamment fluide pour que ses molécules puissent se déplacer et entrer en contact dans le champ des forces de cohésion, avec les molécules du corps rigide.

Si un liant a mouillé un minéral sec, il se trouve dans une certaine mesure, dans une position privilégiée vis-à-vis de l'eau qui entrerait en contact ultérieurement. L'eau peut parvenir à déplacer le liant du minéral pour mouiller ce dernier préférentiellement ; ceci est dû au fait que l'énergie de mouillage de l'eau vis-à-vis du minéral est généralement supérieure à l'énergie de mouillage du liant pour ce même minéral. Le déplacement se fera dès que l'eau peut entrer en contact avec la paroi nue du minéral par quelque point, notamment par quelque fissure ou quelque déféctuosité dans la continuité de la pellicule que forme le liant, qui apparaîtront çà ou là.

Toutefois, le déplacement se fera avec une lenteur très rapidement croissante si le liant devient rapidement visqueux car il s'opposera ainsi au déplacement de l'eau par une force d'inertie de plus en plus grande. Néanmoins, il ne faut pas que le liant devienne fragile car, outre qu'il tend à se fissurer et s'écailler (amorce de contact du minérale et l'eau), son déplacement se trouve facilité dans cet état à la manière d'une peinture vieillie qui tend à se

détacher de son support. L'adhérence d'un liant pour un minéral c'est d'une manière pratique, la faculté pour un liant ayant mouillé le minéral de résister au déplacement par l'eau. Ainsi envisagée, l'adhésivité sera mieux conservée :

- ✦ d'autant que l'énergie d'adhérence du liant pour le minéral sera plus élevée ;
- ✦ que le liant sera plus visqueux ;
- ✦ que l'épaisseur du liant d'enrobage sera plus importante ;

Comme il s'agit de l'adhésivité préférentielle d'un liant hydrocarboné pour un agrégat en présence d'eau, il apparaît comme essentiel en pratique de considérer deux processus distincts :

- ✦ le liant et l'agrégat sont seuls au cours du mouillage, l'eau n'apparaît qu'ensuite. Dans ce cas, le liant bénéficie de la position du premier occupant et même si l'affinité de l'agrégat vis-à-vis de l'eau est plus importante, le liant peut résister longtemps au désenrobage grâce à sa viscosité d'abord et la perfection de l'enrobage ensuite. A ce titre, une fois l'enrobage effectué, le liant a intérêt à devenir rapidement visqueux pour éviter son déplacement par l'eau ou même sa mise en émulsion grossière sous le trafic ;
- ✦ le liant et l'agrégat doivent entrer en contact alors que l'eau est déjà présente. Le liant ne pourra manifestement mouiller le minéral et y adhérer qu'en présence de dopes ou par suite d'une composition spéciale donnant au liant une affinité particulière pour la nature de l'agrégat utilisé. Les liants, qu'ils s'agissent de produits goudronneux, par la présence de certains acides notamment sont anioniques en présence d'eau. Pour les goudrons ce sont les phénols qui produisent cet effet et pour les bitumes ce sont les acides naphthéniques en particulier. Ces corps ont donc de l'affinité pour les matériaux qui mouillés par l'eau, ont une surface cationique (exemple : calcaire). L'affinité des cations pour les anions provoque la soudure normale des liants à l'agrégat grâce à la mobilité des molécules du liant.

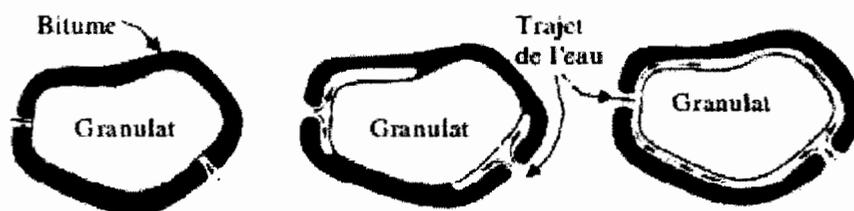


Figure 2.1.: Désenrobage d'un gravillon en présence d'eau.

Les méthodes qui permettent d'améliorer l'affinité liant-granulat peuvent être résumées dans le tableau suivant :

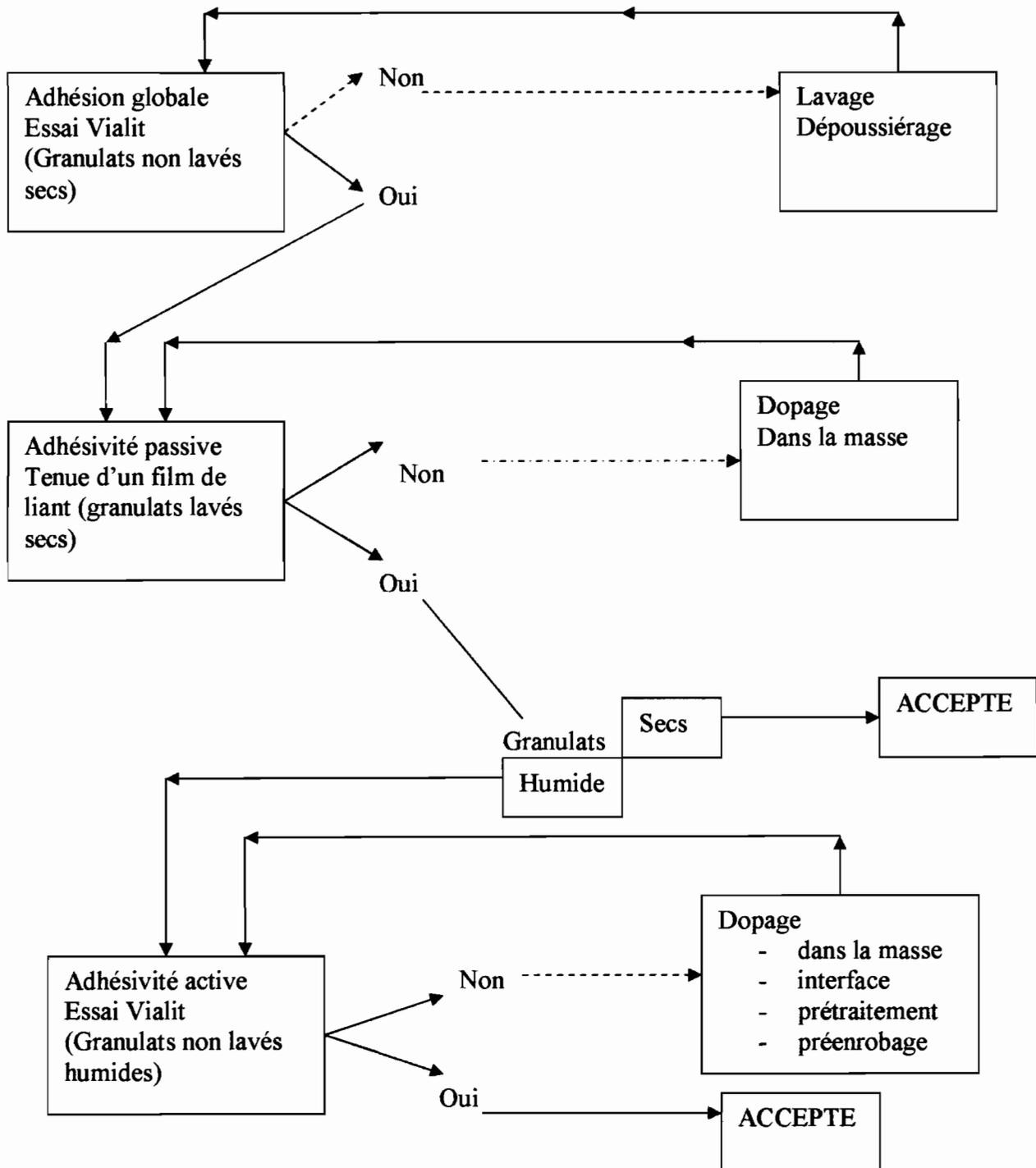


Figure 2.2.: méthodes qui permettent d'améliorer l'affinité liant-granulat

2.2.3. Les dopes d'adhésivité :

Ce sont des produits complexes qui modifient les conditions d'équilibre des constituants granulats, liants, eau.

Ils favorisent le mouillage des granulats par le liant et s'opposent ultérieurement à la rupture de cette liaison.

Quel que soit leur mode d'utilisation, les dopes d'adhésivité doivent modifier l'état de surface des granulats et les rendre hydrophobes, de façon aussi durable que possible.

Ils font appel à 2 notions :

- ✦ L'adhésivité active : c'est la faculté pour un liant de déplacer l'eau de la surface d'un granulat et de s'installer à sa place.
- ✦ L'adhésivité passive : qui désigne la résistance d'un liant à rester fixé à la surface d'un granulat en présence d'eau.

Traitement du granulat.

On distingue 2 types d'applications :

- ✦ Incorporation du dope d'adhésivité dans la masse du liant
- ✦ Traitement à l'interface.

Dans le cas de l'incorporation dans la masse, le dope doit être intimement mélangé au liant que ce soit au niveau du stockage ou directement dans le matériel de répandage.

Les techniques faisant appel aux dopes sont principalement les suivantes : enduits superficiels au bitume pur ou bitume fluxé et enrobés à chaud. Dans tous les cas le dosage en dope se situe entre 2 et 5 kg par tonne de liant (et doit être faible pour une question de coût).

Dans le cas du traitement à l'interface, le dopage est réalisé par pulvérisation de dispersions aqueuses de dopes auto-dispersibles dans l'eau. Ce dopage nécessite un matériel spécial.

Pour ce qui est du traitement des granulats, il consiste en un mouillage complet, suivi ou non d'un séchage, par une solution ou une dispersion dans l'eau d'un agent d'adhésivité. Ce prétraitement a une durée de conservation limitée, c'est pourquoi il est recommandé de ne l'effectuer qu'au moment de la reprise des granulats sur l'aire de stockage.

La technique faisant appel aux dopes d'interface concerne les enduits superficiels aussi bien pour les applications à chaud qu'à froid.

Dans tous les cas, le dosage du dope est de l'ordre de 2 à 3 g par m² de surface. Leur utilisation se fait en dosage très faible, ils sont assez coûteux.

Le chapitre suivant traite de l'ensemble des dégradations que sont assujettis ces matériaux.

Chapitre III GÉNÉRALITÉS SUR LES DÉGRADATIONS DES CHAUSSÉES FLÉXIBLES

Dès sa mise en service, la route se dégrade.

L'usure de la couche de surface est la conséquence des efforts de cisaillement qui se manifestent au contact des pneumatiques et dont la résultante équilibre les forces de traction. Elle entraîne essentiellement des pertes de matériaux des couches de roulement non revêtues, et le polissage des granulats des tapis superficiels au trafic.

Les causes directes de ces dégradations peuvent provenir d'un mauvais calcul structural, d'un mauvais matériau, d'une construction déficiente ou d'un entretien inadéquat.

La fatigue des couches inférieures de la chaussée résulte, au contraire, des efforts verticaux de transmission des charges à la fondation. La répétition des contacts intergranulaires entraîne des effets d'attrition, la production de fines, et l'augmentation de la plasticité de la chaussée. Celle-ci devenant moins rigide, les déformations sous charges augmentent, deviennent irréversibles, et il en résulte une destruction plus ou moins rapide de la couche de roulement.

Tous les types de dégradations prennent naissance au niveau des couches supérieures de la chaussée pour ensuite attaquer les couches inférieures ; les deux premières apparaissent dès le premier stade de vieillissement qui se situe entre deux et cinq ans généralement. Les autres sont observées ordinairement entre trois et dix ans après la construction.

Le présent chapitre est consacré à la description des principaux types de dégradations des chaussées revêtues, leurs causes probables, et à leurs remèdes.

3.1. Les types de dégradations des chaussées revêtues :

Les dégradations sont classées en deux catégories :

- les dégradations de type A ;
- les dégradations de type B.

3.1.1. Les dégradations de type A :

Elles caractérisent un état structural de la chaussée, soit lié à l'ensemble des couches et du sol, soit seulement lié à la couche de surface. Ce sont des dégradations issues d'une insuffisance de capacité structurale de la chaussée qui interviennent dans la recherche de la

solution en association avec d'autres critères et notamment la portance caractérisée par la déflexion statique. Ces dégradations sont au nombre de trois :

- la déformation;
- la fissuration;
- le faïençage ;

3.1.1.1. Les déformations :

3.1.1.1.1. Les ornières :

Ce sont des dépressions laissées par le passage des roues des véhicules, de l'ordre de 250 mm de largeur. On les attribue à un tassement causé par une circulation dont le poids s'est concentré à cet endroit de la chaussée. Si le tassement s'accompagne d'un déplacement du matériau de fondation, on voit apparaître une déformation de la chaussée.

Le profil transversal de ces dépressions est souvent similaire à des traces de pneus simples ou jumelés, ou correspond à une courbe parabolique très évasée.

L'usure, particulièrement celle causée par les pneus cloutés, rend aussi la chaussée très dangereuse. En effet, par temps de pluie, on peut observer de nombreuses flaques d'eau dans les ornières. Les dérapages, dus au phénomène d'aquaplaning (ou d'aquaplanage), sont par voie de conséquence, plus fréquents.

Dans certaines conditions, une ornière profonde est dangereuse, la circulation y devenant risquée. Le phénomène n'est pas uniquement fonction de la profondeur de l'ornière, mais aussi de la vitesse du véhicule, du type de pneu, de l'usure des pneus, de la porosité de la surface, de l'intensité de l'averse, de la pente transversale de la chaussée, etc.

Normalement, les ornières dont la profondeur est inférieure à 12 mm ne posent pas de problèmes sérieux, mais celles dont la profondeur est supérieure à 25 mm peuvent en poser.

Les causes probables sont :

- inadéquation entre la formulation et la température d'usage;
- trafic lourd important et canalisé ;
- rampes : vitesse lente des véhicules;
- zones de freinages, courbes à petit rayon ;
- maniabilité élevée de l'enrobé;
- inadéquation entre la formulation et le trafic.
- Enrobé à stabilité réduite par temps chaud (ex : bitume trop mou ou surdosage).

- Enrobé trop faible pour bien résister au trafic lourd (ex : fluage).
- Compactage insuffisant de l'enrobé lors de la mise en place.
- Usure de l'enrober en surface (abrasion).
- Vieillessement (accumulation des déformations permanentes).
- Compactage insuffisant dans les couches granulaires à la construction.
- Capacité structurale insuffisante de la chaussée.
- Mauvais drainage des matériaux granulaires de la chaussée.

L'évolution prévisible conduit à :

- approfondissement de l'ornièrè, accompagné de fissuration longitudinale et de faïençage ;
- ressuage ou indentation dans les bandes de roulement ;
- formation de bourrelets longitudinaux.

3.1.1.1.2. Les Ondulations :

Ces défauts se présentent d'une façon irrégulière sous forme de dépression le long ou en travers de la route. Les causes les plus connues sont au nombre de trois :

- un retrait ou un gonflement non uniforme des sols dû à des variations de la teneur en eau, particulièrement dans les sols argileux ;
- un soulèvement non uniforme causé par le gel ;
- un tassement non uniforme ou différentiel sous le poids du remblai de la route dû à une densité non uniforme des fondations, de l'infrastructure et du sol naturel. Dans ce dernier cas, on observe les ondulations le plus souvent au point de contact entre les déblais, entre le sol et le roc, et dans les remblais d'approche près des viaducs et des ponceaux.

Des déformations d'aspect ondulatoire peuvent se produire sur des revêtements épais, ou sur des couches de base en enrobés fins aux carrefours, aux accès d'ouvrages ou dans les rampes.

Elles sont la conséquence des freinages répétés et sont imputables à un défaut de stabilité de l'enrobé.

Le seul remède est une réfection totale.

3.1.1.1.3. Affaissement :

C'est une distorsion du profil en bordure de la chaussée ou au voisinage de conduites souterraines.

Les causes probables sont :

- manque de support latéral et instabilité du remblai ;
- présence de matériaux inadéquats ou mal compactés ;
- zone de déblai argileux ou secteurs marécageux ;
- affouillement ou assèchement du sol support (milieu urbain) ;
- mauvais état des réseaux souterrains (milieu urbain).

On distingue trois niveaux de sévérité :

Faible : Dénivellation dont la profondeur est inférieure à 20 mm. À la vitesse maximale permise, la sécurité n'est pas compromise et l'effet sur le confort au roulement est négligeable.

Moyen : Dénivellation dont la profondeur est comprise entre 20 et 40 mm. À la vitesse maximale permise, la sécurité est peu compromise et le confort au roulement est modérément diminué.

Majeur : Dénivellation dont la profondeur est supérieure à 40 mm. À la vitesse maximale permise, la sécurité est compromise et le conducteur doit ralentir. Le confort au roulement est fortement diminué.

On distingue dans cette famille, les affaissements de bord de chaussée qui sont dus à une butée insuffisante des accotements ou à un défaut de portance de la fondation.

Ils sont fréquents sur les routes que l'on s'est contenté de revêtir sur une plate-forme trop étroite, sans l'élargir pour reconstituer des accotements suffisants.

Ces affaissements se rencontrent souvent le long des accotements non dérasés dont la présence favorise les infiltrations d'eau de pluie en bordure de la chaussée.

Ils peuvent encore provenir d'un défaut de drainage.

Le seul remède consiste à reprendre le profil en travers.

3.1.1.2. Les fissures :

3.1.1.2.1. Fissures longitudinales :

Ce sont des dégradations de surfaces caractérisées par une ligne de rupture apparaissant à la surface de la chaussée.

Ces fissures sont sensiblement parallèles à l'axe de la chaussée. Les causes probables sont :

- fatigue de la structure par excès de contrainte à la base des couches traitées ayant pour origine un sous dimensionnement ou un décollement entre couches ;
- Fatigue du revêtement (trafic lourd).
- Capacité structurale insuffisante de la chaussée.
- Mauvais drainage des courbes granulaires de la chaussée.
- Ségrégation de l'enrobé à la pose (ex : centre de l'épandeur).
- Vieillessement du revêtement.

L'évolution prévisible des fissures longitudinales est :

- épaufure des bords de fissure favorisant la pénétration de l'eau ;
- ramification, dédoublement de la fissure avec ouverture des lèvres liée au départ de matériaux en bord de fissure ;
- faïençage à maille fine ;
- orniérage à grand rayon et nids de poule lorsque les fissures sont dues à une résistance insuffisante des matériaux d'assise.

3.1.1.2.2. Fissures en carrelage :

C'est une rupture du revêtement sur des superficies plus ou moins étendues, formant un patron de fissuration à petites mailles polygonales dont la dimension moyenne est de l'ordre de 300 mm ou moins.

Les causes probables :

- Fatigue (ex : épaisseur de revêtement insuffisante) ;
- Vieillessement de la chaussée (oxydation et fragilisation du bitume dans l'enrobé) ;
- Capacité portante insuffisante.

On les classe suivant trois niveaux de sévérité :

Faible : Maillage composé de fissures simples aux bords francs.

Moyen : Maillage composé de fissures simples aux bords faiblement détériorés.

Majeur : Maillage composé de fissures simples aux bords détériorés.

3.1.1.2.3. Fissures en rive :

C'est une rupture en ligne droite ou en arc de cercle, le long de l'accotement ou de la bordure, ou décollement du revêtement le long de la bordure.

Les causes probables sont :

- manque de support latéral (exemple : accotement étroit et pente de talus abrupte) ;
- discontinuité dans la structure (exemple : élargissement) ;
- assèchement du sol support (milieu urbain) ;
- Apport latéral d'eau de ruissellement dans la structure de la chaussée.

3.1.1.2.4. Fissures transversales :

Ces fissures sont perpendiculaires à la route et la traversent complètement ou partiellement. On les retrouve généralement à intervalles irréguliers; mais dans certains cas, pour une cause encore imprécise, elles se forment à intervalles très réguliers.

Les causes probables sont :

- l'abaissement subit de la température provoquant un retrait du revêtement ;
- l'infiltration de l'eau et l'action non uniforme du gel dans les sols ;
- un tassement non uniforme ;
- Vieillesse et fragilisation du bitume ;
- Remontée de fissures après des travaux de resurfaçage ;
- Joint de construction mal exécuté (arrêt et reprise des travaux de pose d'enrobé) ;
- Diminution de la section du revêtement (ex : vis-à-vis des regards ou des puisards).

En l'absence de colmatage, le nombre de fissures transversales augmente :

- les épaufrures en bord de fissures, qui augmentent le risque d'infiltration d'eau ;
- le décollement entre la couche de surface et l'assise ;
- les remontées des fines;
- la ramification et le dédoublement de fissures ;
- au stade ultime, la partie haute de l'assise traitée aux liants hydrauliques se dégrade significativement, ce qui amène des affaissements et des nids de poules.

On peut classer les fissures suivant leur niveau de sévérité et on distinguera trois niveaux de sévérité :

Faible : Fissures simples et intermittentes dont les ouvertures sont inférieures à 5 mm. Les bords sont en général francs et bien définis. Les fissures avec scellement en place en bonne condition sont incluses dans ce niveau de sévérité.

Moyen : Fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de 5 à 20 mm. Les bords sont parfois érodés et un peu affaissés. Sans être inconfortable, la fissure est perceptible par l'utilisateur.

Majeur : Fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de plus de 20 mm. Les bords sont parfois érodés et il y a affaissement ou soulèvement au voisinage de la fissure. Le confort au roulement est diminué par les déformations de surface.

3.1.1.2.5. Fissures latérales :

Ces fissures sont longitudinales et situées près du bord du revêtement. Elles sont dues bien souvent à une mauvaise géométrie de la chaussée ; les accotements ne sont pas suffisamment larges et les pentes vers les fossés sont trop raides, d'où instabilité par manque de support latéral. Un accotement pavé prévient efficacement l'apparition de ces fissures, l'eau ne pouvant alors s'infiltrer sous le revêtement et miner les matériaux de fondation.

3.1.1.2.6. Fissuration polygonale :

Dans ce cas, le revêtement flexible présente un réseau de fissures constituant des polygones de 7 à 20 cm de diamètre. En langage populaire on les appelle peaux de crocodile ou d'alligator. Elles se rencontrent surtout sous le passage des roues et sont dues à la faiblesse des fondations. Même si les calculs d'une route ont été bien faits et la route bien construite, la fatigue peut aussi causer une fissuration polygonale ; en effet, la répétition des charges trop lourdes ou dépassant celles qui ont été prévues n'est pas étrangère à ce phénomène.

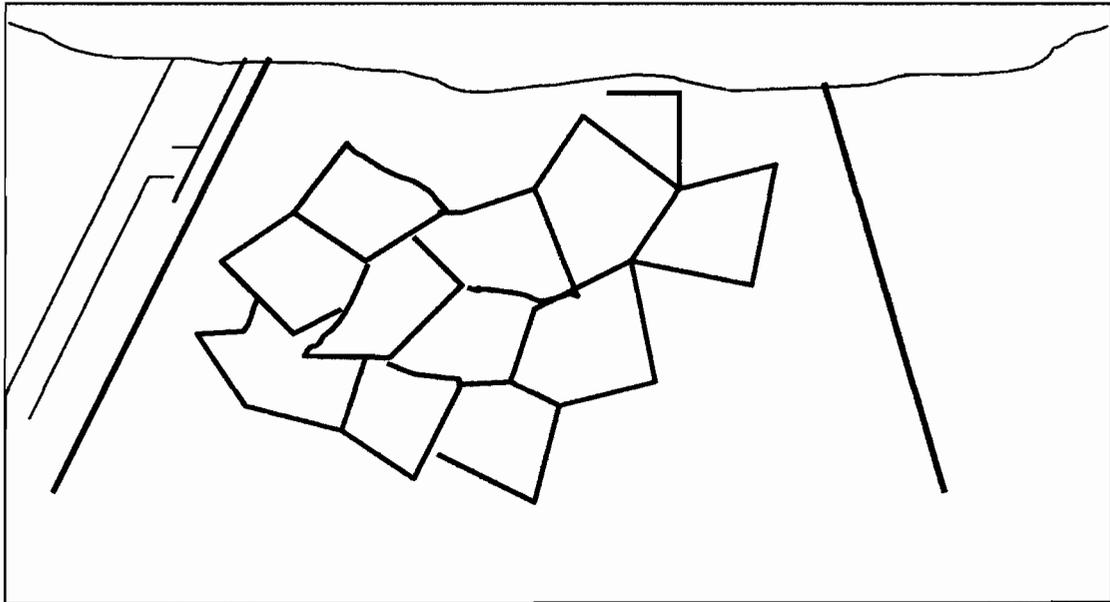


Figure 3.1.: Fissures polygonales

3.1.1.2.7. Lézardes :

Ces fissures sont généralement longitudinales et réparties au hasard. Il faut les distinguer des fissures de centre et des fissures latérales. L'action du gel, l'infiltration de l'eau, un tassement différentiel sont toutes des causes probables de la formation de ces dégradations. On observe surtout ces tassements aux endroits où de la terre végétale ou arable a été laissée en place. Ces sols sont très compressibles. Si on y applique une charge, comme un remblai, un premier tassement se produira une fois la route terminée. Sous le poids des véhicules, un tassement ultérieur se produit d'une façon différentielle pour créer des ondulations suivies de fissures. Les lézardes peuvent aussi se produire lorsque, par suite d'un mauvais drainage, un sol sensible perd sa capacité de support en présence d'eau et, sous les charges, flue sur les côtés.

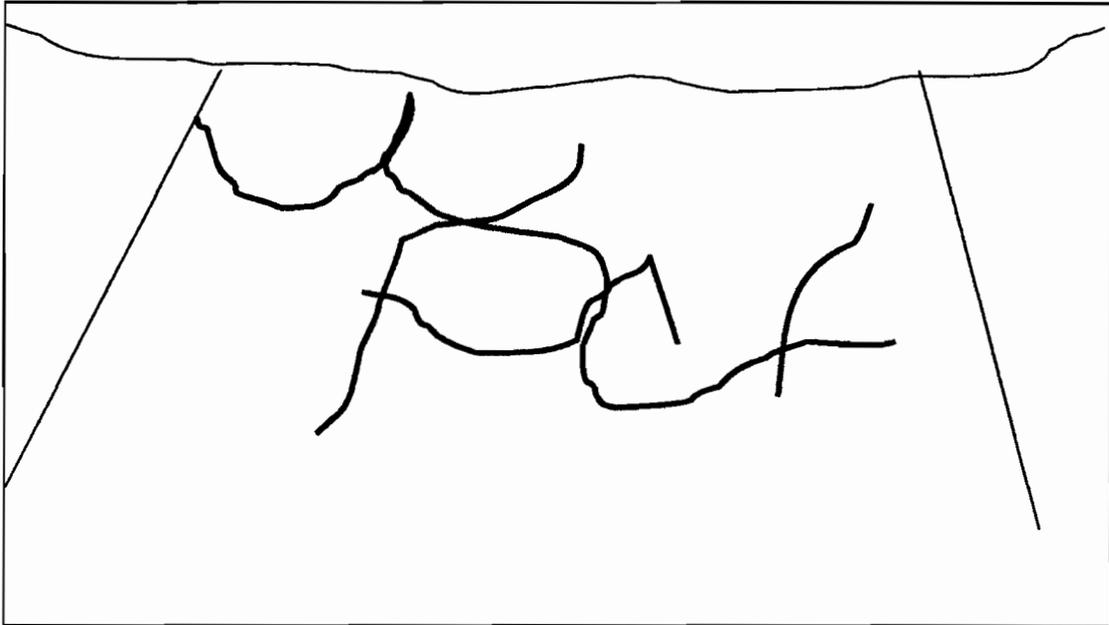


Figure 3.2.: Lézardes

3.1.1.3. Faièncage :

C'est un ensemble de fissures entrelacées ou maillées formant une série de polygones. Le faièncage affecte les couches de surface en enrobé. Il consiste en un réseau irrégulier, et parfois très serré de fissures qui arrive rapidement à compromettre l'imperméabilité.

Il résulte d'un défaut d'adaptation du revêtement aux déformations de la couche de base. Il est donc imputable à la fatigue ou à l'insuffisance de celle-ci, à une diminution de plasticité de la couche de roulement consécutive au vieillissement du liant, ou à la production de fines sous l'effet de la circulation.

Les causes probables sont :

- fatigue excessive de l'assise provoquée par un excès de contrainte de traction par flexion à la base des couches traitées ;
- décollement de la couche de roulement.

L'évolution prévisible :

- départ de matériaux, formation de nids de poules ou encore pelade ;
- chute de portance due à la pénétration de l'eau dans le corps de chaussées. Cela est à l'origine de déformation (ornièrage à grand rayon, affaissement de rive et hors rive) ;
- augmentation des zones faièncées.

Dans le cas où la couche de base est hors de cause, et si le mal est pris à son début, un traitement de régénération aux huiles fluidifiantes peut être tenté. Sinon il est préférable d'appliquer un enduit, qui permet de rétablir plus sûrement l'imperméabilité de la surface.

Lorsque les fissures atteignent plusieurs millimètres elles sont, préalablement au revêtement, nettoyées au balai ou à l'air comprimé, puis remplies à l'aide d'agrégats de petit calibre et d'un liant bitumineux.

Si la cause du faïençage se trouve dans l'insuffisance des couches inférieures, il faut se résigner au renforcement.

Parmi les types de faïençage on peut citer « la peau de crocodile » qui est une maladie des enduits et qui se manifeste par un réseau plus ou moins rectangulaire de fissures intéressant toute l'épaisseur du revêtement et pouvant aboutir à sa désagrégation totale.

Elle est souvent imputable à un défaut de résistance de la couche de base.

Si elle est généralisée, on devra donc d'abord examiner si les caractéristiques de la chaussée sont adaptées à l'évolution du trafic et, au besoin, envisager un renforcement.

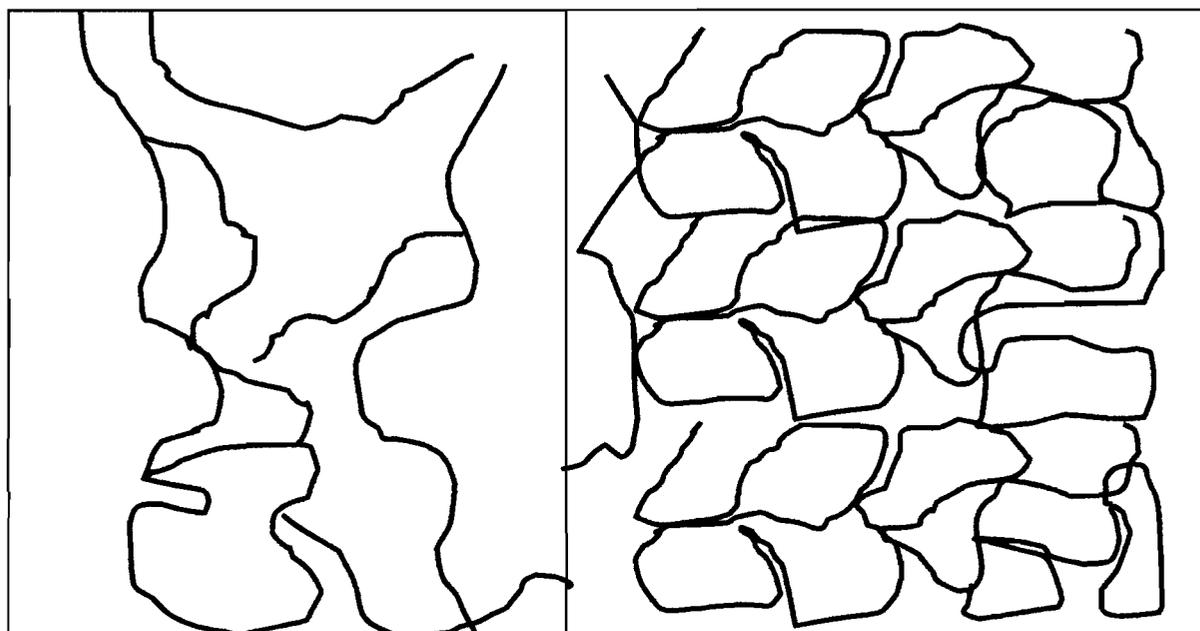


Figure 3.3.: Faïençage à mailles larges

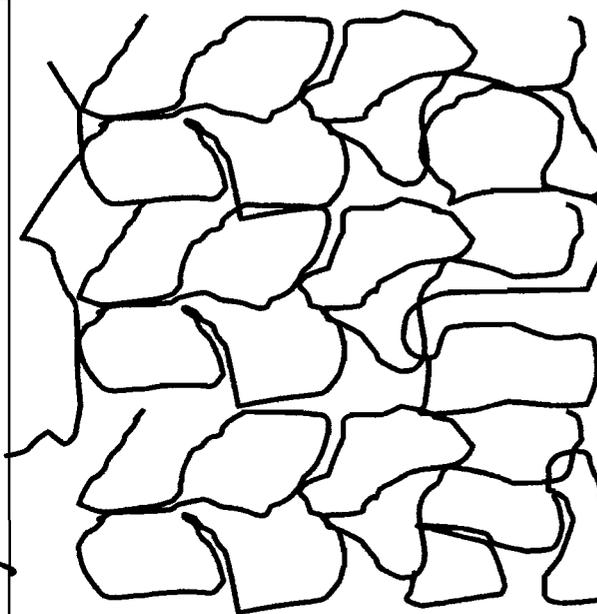


Figure 3.4.: Faïençage généralisé

3.1.2. Les dégradations de type B :

Ces dégradations engendrent des réparations qui généralement ne sont pas liées à la capacité structurelle de la chaussée. Leur origine est soit un défaut de mise en œuvre, soit un défaut de qualité d'un produit, soit une condition locale particulière que le trafic peut accentuer bien évidemment.

Dans les dégradations de type B on distingue :

- la fissuration, hors fissures de fatigue : c'est les fissures longitudinales de joint, les fissures transversales de retrait thermique ;
- les nids-de-poule ;
- les arrachements et de manière générale tous les défauts du revêtement de type ressuage, plumage, etc.;
- le retrait thermique des matériaux bitumineux ;
- le retrait argileux des couches de chaussées.

3.1.2.1. Nid de poule :

Ce terme est employé couramment pour désigner des trous de forme arrondie à la surface d'une chaussée. Les nids de poule sont donc des cavités à bord francs, plus ou moins profondes, caractérisées par la destruction complète de la couche de roulement et l'éjection de quantités importantes de matériaux du corps de chaussée. Ils se propagent parfois en chapelets, entraînant alors rapidement la ruine complète de la route. Lorsque ces cavités ont plus de 30 cm de diamètre, on peut employer le terme pelade. Dans le cas du béton bitumineux, ce sont des couches de roulement qui sont enlevées par la circulation.

Ce phénomène apparaît surtout durant l'hiver lors d'un dégel inattendu. L'eau s'infiltré par des fissures et un nouveau gel fait soulever ou peler le béton bitumineux. Certains défauts, comme des fissures ou des craquelures, permettent d'amorcer une désagrégation en nid de poule. D'autres causes peuvent aussi produire ce type de dégradation : une mauvaise granularité des granulats, une densité insuffisante du mélange ou une mauvaise préparation de la fondation supérieure (une teneur en eau excessive, par exemple), etc.

Les causes probables :

- Faiblesse ponctuelle de la fondation ;

- Epaisseur insuffisante du revêtement ;
- Chaussée fortement sollicitée par le trafic lourd.

Comme remède, la méthode du point à temps décrite dans la suite est recommandée.

3.1.2.2. Flache :

C'est une déformation localisée en creux de la surface de la chaussée : c'est une dépression de forme arrondie.

Les flaches proviennent en général d'un défaut de résistance d'une couche inférieure de la chaussée, ou de la fondation.

Elles peuvent être également dues à une insuffisance de stabilité d'une couche de surface en enrobés.

Les causes probables sont :

- d'un défaut de compactage (portance du sol);
- d'une rupture de canalisation;
- de dégradations de couches inférieures en un point sensible (présence de matériaux sans consistance...);
- des conditions de drainage et d'assainissement.

3.1.2.3. Bourrelet longitudinal :

C'est un déplacement du revêtement de la chaussée, créant un renflement allongé dans la direction du trafic.

Les causes probables sont :

- arrêt et démarrage des véhicules aux carrefours (zones de démarrage brutal) ;
- manque de liaison entre le revêtement bitumineux et la couche sous-jacente ;
- défaut de compactage de la construction ;
- la fatigue de la chaussée (fluage).

3.1.2.4. Pelade :

Arrachement par plaques de l'enrobé de la couche de surface.

Les causes probables :

- Mauvaise adhérence de la couche de surface (ex : manque de liant d'accrochage, incompatibilité chimique, saleté entre les couches).

- Epaisseur insuffisante de la couche de surface.
- Chaussée fortement sollicitée par le trafic.

3.1.2.5. Dentelles de rive :

C'est une dégradation qui se manifeste par l'érosion de la couche de roulement à partir des bords.

Elle est provoquée par les arrêts fréquents sur les accotements.

On peut aussi noter parmi les dentelles de rive, l'usure des bords de revêtement.

Elle est due à l'absence de butée latérale. Elle est souvent aggravée par l'action des eaux de surfaces sur des accotements insuffisamment stabilisés, ou en pente trop forte.

3.1.2.6. Ressuage :

C'est la remontée de bitume à la surface du revêtement, accentuée dans les pistes de roues.

Les causes probables :

- Surdosage du bitume ;
- Effet combiné de la température élevée du revêtement et des sollicitations du trafic ;
- Excès de liant d'accrochage ;
- Formulation d'un enrobé inadapté aux sollicitations.

Le ressuage peut entraîner des placards.

Ils se manifestent lorsque le mélange bitumineux contient un excès de bitume qui situe à la surface sous forme de plaques plus foncées. La remontée du liant vers la surface du revêtement s'appelle ressuage. Un placard crée un danger de dérapage lorsque la chaussée est mouillée.

3.1.2.7. Arrachement ou déchaussement :

Ici les gros granulats sont arrachés, laissant des cavités dans les revêtements flexibles ou rigides. La cause peut être la même que pour le désenrobage, cependant on observe le même phénomène en présence de granulats trop mous tels les schistes. Une action particulière du trafic peut aussi en être la cause. Il ne faut pas oublier aussi les intempéries.

Parmi les arrachements on peut citer les épaufrures.

Elles sont dues à l'effritement de l'enrobage.

L'évolution de ces dégradations peut causer :

- départ de matériaux ;
- les épaufrures deviennent de plus en plus nombreuses et larges.

3.1.2.8. Désenrobage :

C'est un décollement de la pellicule du liant enveloppant le matériau enrobé rendant la surface du revêtement rugueuse.

Le désenrobage des gravillons de la couche de surface peut se traduire à divers âges de la chaussée et présenter des intensités très variables.

Sur un revêtement récent, il peut provenir d'un dosage trop faible en liant, ou d'un défaut d'adhésivité.

Sur une chaussée ancienne, le désenrobage est une manifestation normale d'usure, et en particulier de vieillissement du liant.

Sous l'action des intempéries, le bitume et les fines sont enlevés pour laisser des granulats en relief, rendant la surface du revêtement rugueuse. Ceci est dû à une adhérence insuffisante entre le liant et les granulats par suite d'absorption trop faible de ces derniers.

Elle se traduit aussi par l'érosion du mastic et la perte des gros granulats en surface produisant une détérioration progressive du revêtement.

Les causes probables :

- Usure par trafic intense ;
- Sous-dosage du bitume ou mauvais enrobage ;
- Utilisation d'agrégats hydrophiles;
- Compactage insuffisant ;
- Surchauffe ou vieillissement de l'enrobé (oxydation et fragilisation) ;
- Sollicitations accrues en zone de virage et de freinage.

Le seul remède consiste alors en l'application d'un tapis d'entretien, ou, si le mal est pris à temps, à un traitement de régénération.

3.1.2.9. Les glissements de revêtements :

Ils sont dus à des mouvements très importants de la couche de surface qui se manifestent par un réseau de fissures paraboliques évaluant, dans les cas extrêmes, vers de larges déchirures. Ils sont dus à la fois à un collage défectueux sur la couche de base, et à une

stabilité ou à une épaisseur insuffisante, pour les charges supportées, d'une couche de surface en enrobés minces.

3.2. Les facteurs influençant les dégradations des routes revêtues :

Les facteurs influençant la dégradation des chaussées revêtues sont nombreux et variés bien qu'ils peuvent être connus mais non quantifiables car à l'heure actuelle l'importance relative de ces facteurs n'est connue généralement que d'une manière qualitative.

Les chaussées sont soumises d'une part à un certain nombre de contraintes telles que les charges dues au trafic, le climat (pluie, température), et d'autre part à des facteurs humains liés à la qualité des matériaux, la mise en œuvre, la conception et l'entretien qui conduisent à diverses dégradations dont nous étudierons l'essentiel dans cette partie.

3.2.1. Effets de la circulation :

Pour assurer son rôle c'est-à-dire le plus longtemps possible un bon niveau de confort et protéger de l'eau les couches inférieures, la couche de roulement doit être capable de résister à l'action du trafic.

Les effets de la circulation entraînent :

- Une usure générale de la couche de roulement dont la principale conséquence est la naissance de la tôle ondulée.

Elle se présente sous forme d'ondulations qui règnent le plus souvent sur toute la largeur de la chaussée, mais parfois sur une partie seulement, dans le fond des frayées. La tôle ondulée se manifeste avec une particulière intensité aux abords des ouvrages, aux carrefours et de façon générale dans toutes les zones soumises à des efforts tangentiels fréquents et à des arrachements et principalement pour les routes en terres.

La longueur d'onde, très régulière, varie en général de 0.60 à 1 m. le plus souvent, les bourrelets sont légèrement inclinés par rapport à la normale de l'axe de la chaussée.

L'amplitude des ondulations, en général de 5 à 10 cm, peut parfois atteindre 20 cm. Au début, ces ondulations sont formées de matériaux meubles et peuvent être effacées par simple balayage pour les routes en terre. Si on les laisse durcir, il n'est plus d'autre solution que de les décaper.

La présence de la tôle ondulée constitue à la fois un réel danger pour la circulation et un facteur d'usure accélérée des véhicules. La conduite n'est possible qu'au dessus de 60 à 80

km à l'heure. Tout ralentissement risque d'entraîner une perte de direction, les croisements et les dépassements sont souvent acrobatiques.

La tôle ondulée se forme chaque fois qu'un défaut de cohésion de la surface permet des arrachements de matériaux, que ces matériaux ou au moins une partie d'entre eux restent sur la chaussée, et que ces arrachements se produisent uniformément et non sous forme de nids de poule.

Le défaut de cohésion peut provenir d'une discontinuité dans la granularité du matériau.

- La formation de nids de poule décrite ci-dessus, constitue pour la circulation une gêne.
- Des déformations dans les virages.

En effet, les virages à court rayon constituent des zones soumises à des efforts tangentiels particulièrement importants.

Il arrive très fréquemment que les matériaux chassés vers l'extérieur y constituent un bourrelet qui vient s'installer sur la largeur, en interdisant l'utilisation et augmente la pente du devers. Le phénomène est encore accusé par les petites ravines transversales qui sont la maladie commune de tous les virages.

3.2.2. Effets de l'eau de surface :

Outre le fatigue liée à la circulation automobile, les chaussées sont confrontées à un second facteur de dégradation : l'eau.

En effet, il est inutile d'insister sur l'importance de l'action de l'eau dans tous les pays équatoriaux et même tropicaux où le volume total des précipitations et surtout leur intensité sont très supérieures à ce que l'on trouve dans les pays tempérés.

Les phénomènes d'érosion ne commencent à se manifester que lorsque la vitesse de l'eau dépasse une certaine valeur, que l'on peut appeler vitesse critique d'érosion et qui varie très largement selon la nature du terrain. Il résulte d'essais effectués sur des matériaux à granularité très serrée, que cette vitesse critique d'érosion est minimale, et de l'ordre de 0.30m/s pour de sables de 0.1 mm, alors qu'elle peut atteindre des valeurs supérieures à 1.50 m/s pour les graviers comme pour les argiles. En pratique, elle ne peut guère être appréciée que par observation directe. On admet généralement des vitesses de 0.90 m/s en terrain meuble.

L'eau de surface, affecte aussi la fondation par infiltration à partir des flaches ou bien latéralement depuis des accotements mal entretenus ou des fossés partiellement obstrués. On

aura des affaissements ou même des effondrements localisés accompagnés de la rupture par poinçonnement des couches supérieures de la chaussée, qui sont tout à fait caractéristiques.

3.2.3. La qualité des matériaux :

3.2.3.1. Les granulats :

Les granulats traités aux liants hydrocarbonés doivent remplir les qualités suivantes :

- une bonne résistance mécanique : elle est caractérisée avec les essais de LOS ANGELES (résistance aux chocs) et MICRO DEVAL en présence d'eau (résistance à l'attrition) .Les exigences sur résultats sont fonction du trafic de poids lourds.
- une résistance au polissage : il s'agit d'une contrainte propre aux couches de roulement. Il faut être particulièrement vigilant sur le coefficient de polissage accéléré (CPA) des gravillons qui entrent dans la construction des matériaux.
- L'adhésivité : les matériaux traités avec les liants hydrocarbonés sont particulièrement sensibles aux phénomènes de désenrobage. En effet l'eau peut s'interposer entre les granulats et le liant lorsque la qualité du collage entre ces corps n'est pas suffisante. Il arrive que certains matériaux présentent avec le bitume une adhésivité très moyenne, parfois médiocre. Le moyen le plus couramment utilisé pour résoudre ce problème consiste à remplacer la fraction de sable de ces matériaux par du sable ayant une bonne adhésivité au bitume.

3.2.3.2. Le liant :

Le liant comme son nom l'indique, est la colle qui va assurer la continuité du revêtement, sa fixation au support et la liaison entre les gravillons qui doivent solidement accrochées entre eux.

Le problème d'emploi du liant hydrocarboné est d'arriver à mettre sur la chaussée un liant suffisamment dur pour qu'il puisse ternir durablement les gravillons ; or il est difficile de mettre en œuvre un liant dur. Ainsi pour convenir à l'usage routier, le liant hydrocarboné doit présenter certaines propriétés et en particulier :

- Résistance aux sollicitations sans se fissurer et sans entraîner la rupture au sein des couches. Le couple liant-granat doit avoir donc une bonne cohésion et cette propriété dépend étroitement de celle du liant.
- Susceptibilité thermique (résister sous l'effet des variations de températures);

- Bonne résistance au vieillissement : Sous l'influence de l'oxygène de l'air en particulier, les caractéristiques d'origine du liant hydrocarboné se modifie plus ou moins au cours du temps. D'une façon générale, ceci se traduit par un durcissement et une diminution de la susceptibilité thermique.

3.2.4. La mise en œuvre :

Même si la qualité du liant et des granulats est excellente, le dimensionnement bien fait, une mauvaise réalisation au cours de la mise en œuvre , de la manutention ou de la consolidation pourra se traduire par un ouvrage fini d'une qualité médiocre. Ainsi, une bonne opération de mise en œuvre devra permettre :

- d'assurer une bonne adhérence entre couches ;
- de produire des couches homogènes et compactes ;
- d'offrir une surface régulière et uniforme.

3.2.5. Envahissement par la végétation :

L'envahissement des accotements diminue considérablement la visibilité et par conséquent la sécurité, en particulier dans les virages. Il entrave l'écoulement de l'eau. Les conducteurs sont canalisés dans l'axe de la chaussée, d'où usure en W et naissance, surtout sur les routes à faible circulation, de deux frayées profondes à l'écartement des roues.

Un débroussaillage des accotements s'impose. Sous l'équateur, les accotements doivent être débroussaillés 3 ou 4 fois par an. Mais en savane, également, les grandes graminées constituent une gêne sérieuse.

3.2.6. Envahissement par le sable :

L'envahissement de la plate forme par le sable éolien est un problème spécifique de certaines routes sahariennes.

Il peut être brutal et se produire au cours des tempêtes de sable, sous forme de congères se développant à partir du moindre obstacle. Il peut aussi être plus progressif et résulter du déplacement d'une dune. Il arrive également que les points bas soient envahis par des matériaux fins arrachés par les eaux superficielles.

3.2.7. Autres agents :

On entre ici dans le domaine de la fantaisie et de l'imprévu où, selon les régions, la nature n'a pas de mal à mettre en évidence le caractère artificiel et précaire de la route.

Les agents perturbateurs vont des éléphants qui franchissent la chaussée, la piétinent ou s'y arrête, aux termites qui bâtissent dans les fossés et sur les accotements, aux oryctéropes et aux crabes qui minent la route, etc....

Les troupeaux peuvent être également une source de difficultés. Leur passage habituel contribue à dégrader les chaussées et les accotements et à en compromettre l'assainissement

On étudiera les différentes techniques de recyclage des matériaux bitumineux dans le chapitre suivant.

Chapitre IV LES TECHNIQUES DE RECYCLAGE À CHAUD IN SITU DES ENROBÉS BITUMINEUX

Le recyclage des enrobés est un processus utilisé depuis une quarantaine d'années. Ainsi, face aux contraintes économiques et environnementales de plus en plus pressantes, l'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent les professionnels de la route à chercher de nouvelles sources d'approvisionnement. Ils ont été amenés à s'intéresser aux gisements potentiels de matériaux existants dans les chaussées à démolir ou à rénover.

L'objectif du recyclage à chaud est de fabriquer un enrobé ayant des qualités comparables à celles d'un enrobé neuf, en réutilisant des matériaux récupérés, tout en respectant les contraintes environnementales et technico-économiques. La composition est étudiée pour respecter les caractéristiques et les règles habituelles pour la fabrication des enrobés traditionnels, et plus précisément l'homogénéité du produit final, le respect de l'environnement en matière d'émission de particules solides et de polluants gazeux.

Les différentes techniques de retraitement en place de chaussée sont destinées à recréer, à partir d'une chaussée ancienne et dégradée, une nouvelle structure homogène, stable et de qualité.

Le retraitement doit permettre, tout en limitant l'apport de matériaux neufs, de rénover le profil, l'uni et/ou la portance d'une chaussée. Il permet de conserver ou d'améliorer les caractéristiques géométriques. En général on y applique une couche de revêtement en surface.

4.1. Les techniques de régénération ou de réutilisation du béton bitumineux :

Au fil des ans et sous l'effet du trafic, les couches de roulement des chaussées vieillissent, s'usent et perdent leurs qualités initiales occasionnant des déformations de nature diverse. Cette usure est accentuée sur les grands itinéraires et sur les autoroutes où le trafic est de plus en plus important et de plus en plus lourd.

Ces phénomènes, sans mettre en cause la tenue générale de la chaussée, peuvent être dangereux pour l'utilisateur.

Pour des raisons économiques et compte tenu de l'épuisement des gisements de matériaux, non renouvelables, des techniques nouvelles d'entretien sont apparues au cours des dernières années :

- Le rabotage et le fraisage à chaud ;
- Le thermoreprofilage ;
- La thermorégénération ;
- L'apport d'huile de régénération.

Ces techniques connues sous les noms de thermorecyclage, thermoreprofilage ou thermorégénération sont déclinées sous le seul vocable de thermorecyclage ou recyclage en place à chaud. Ce terme regroupe toutes les opérations de recyclage d'enrobés bitumineux en place par chauffage, scarification du revêtement, malaxage avec ou sans ajout (granulats prélaqués ou non, liants, additifs,...) et remise en œuvre du mélange.

4.1.1. Le rabotage et le fraisage à chaud :

Lorsque la couche de roulement présente en surface des signes de fatigue marqués tels que fissuration, décollement, orniérages et que la mise en place d'une couche en surépaisseur pose des problèmes, le second procédé consiste à enlever la partie supérieure du revêtement par un rabotage ou un fraisage à chaud. C'est-à-dire qu'avec une même machine le matériau enrobé est réchauffé à 160 ou 180 °C ce qui le rend malléable, puis enlevé et mis en cordon par fraisage au moyen de dents scarificatrices ou par rabotage au moyen de lames réglables en profondeur et en direction. Ces machines permettent la dépose de matériau jusqu'à 4 cm environ de profondeur.

Le rabotage et le fraisage à chaud éliminent l'enrobé scarifié pour laisser la place à une égale épaisseur d'enrobé neuf.

Dans certains pays comme la France, le procédé à chaud semble en régression sensible devant le procédé à froid en raison des performances supérieures des machines, de la sensibilité aux conditions atmosphériques de travail à chaud et de la plus grande facilité de stockage et de recyclage des matériaux récupérés à froid.

4.1.2. Le thermoreprofilage :

Cette technique est une variante améliorée du fraisage à chaud qui consiste à remettre en forme une couche de roulement en enrobés bitumineux, déformée ou usée sans enlèvement de matériaux ni apport d'enrobés neufs. Le travail est exécuté au moyen d'un thermoreprofileur qui effectue les opérations suivantes :

- Un chauffage à environ 160 °C par un dispositif à infrarouge qui ramollit l'enrobé de la couche à retravailler ;
- Une scarification à réglage hydraulique qui griffe et décohesionne le matériau réchauffé en le pénétrant jusqu'à la profondeur nécessaire pour redresser le profil déformé. Cette profondeur pouvant varier de 1 à 4 centimètres. Les dents du scarificateur sont disposées de telle sorte qu'il se produit une réhomogénéisation de l'enrobé sans destruction des granulats. Une lame répétitrice réglable en hauteur, animée d'un mouvement transversal, égalise le matériau travaillé qui s'est accumulé entre le scarificateur et la poutre lisseuse. Cette dernière équipée de plaques chauffantes, de dameurs et de vibreurs permet d'obtenir un précompactage efficace du matériau retraité qui sera complété par un compactage définitif au moyen d'un atelier classique.

Cette technique peut être envisagée lorsque la chaussée ne présente aucun défaut de structure et sous réserve d'un examen préalable des caractéristiques de l'enrobé en place et tout particulièrement de celle du bitume.

4.1.3. La thermorégénération :

Ce procédé, très largement utilisé aux Etats-Unis sous la dénomination de « *reparing* », est une amélioration de la technique précédente du thermoreprofilage. En effet, il s'agit ici de restaurer le profil en travers de la chaussée en conservant en place tout ou partie des enrobés anciens avec apport d'enrobés neufs sur le support chauffé et foisonné.

L'opération est menée de bout en bout par une machine (*figure 4.1.*) qui assure toutes les fonctions de réchauffage et scarification de l'enrobé existant, évacuation éventuelle du matériau excédentaire, apport de matériaux neufs, lissage et précompactage. Les enrobés foisonnés laissés en place sont utilisés pour le nivellement du profil par distribution transversale pour obtenir une surface bien plane.

Les enrobés neufs sont introduits à l'avant de la machine comme dans un finisseur classique, transportés à l'arrière et mis en place par le vibreur dameur.

Ainsi, les enrobés anciens remaniés constituent un reprofilage et les enrobés neufs une couche d'usure de 2 centimètres d'épaisseur environ. Ces deux enrobés doivent être compactés simultanément immédiatement derrière la machine.

Cette technique de thermorégénération a connu un développement très rapide. En France, les premières planches ont été exécutées en 1976 et dès l'année suivante 200 000 m² d'autoroutes ont été traitées en phase opérationnelle. Les résultats très encourageants ont conduit en 1979 au traitement de 1.5 million de m² en 1980 particulièrement sur des chaussées d'autoroutes dont la couche de roulement était fissurée par suite d'un vieillissement exagéré du bitume, et sur le boulevard périphérique de Paris où la surface présentait des défauts d'orniérage dus à un trafic poids lourds canalisé hors de toute proportion.

La thermorégénération permet de ne traiter que la voie lente soumise aux plus fortes contraintes sans avoir à retoucher l'ensemble de la chaussée. Cette particularité lui confère un avantage économique important dans tous les cas où une solution classique entraînerait un traitement en pleine largeur.

Au plan énergétique, cette solution est environ deux fois moins coûteuse qu'un tapis de 4 cm d'épaisseur à égalité de surface traitée.

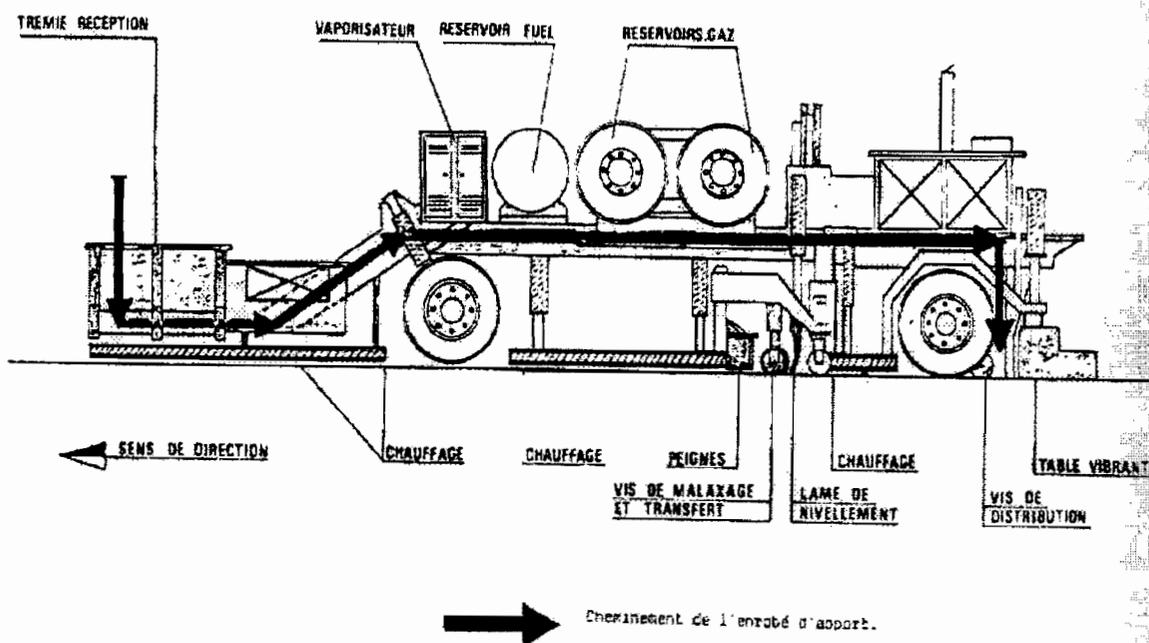


Figure 4.1.: schéma d'une machine de thermorégénération

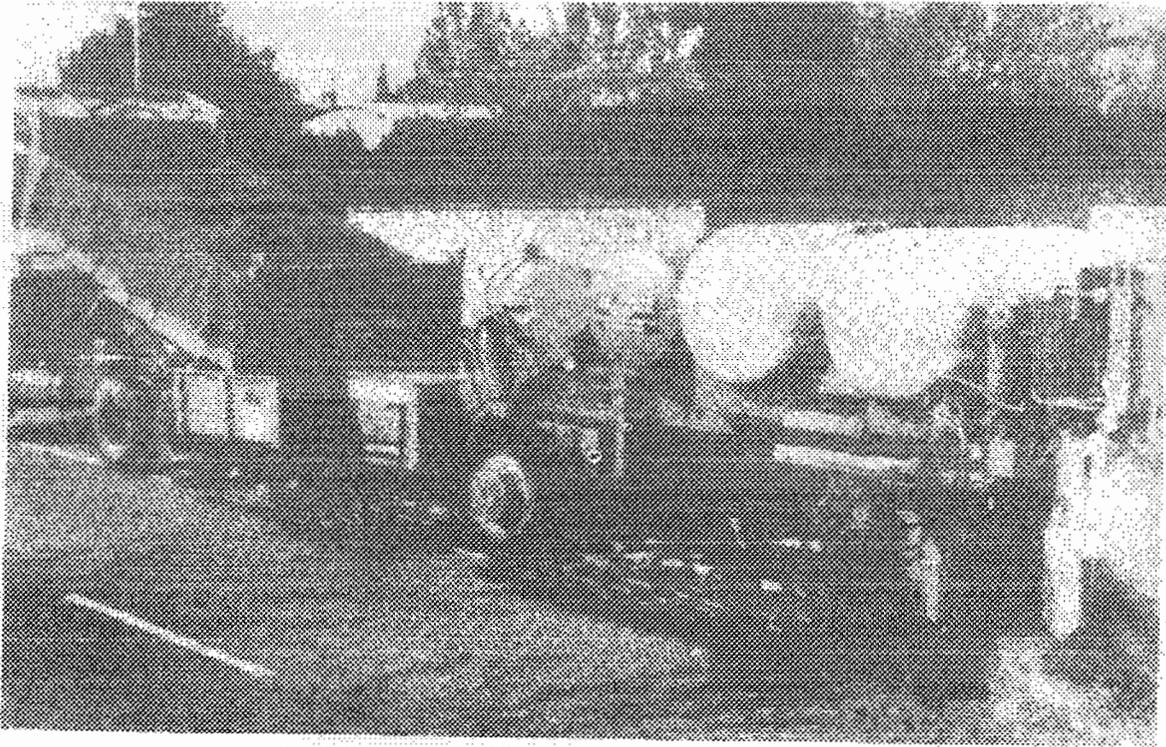


Figure 4.2 : un chantier de thermorégénération

4.1.4. Les huiles de régénération :

Après quelques années de présence sur la route, le bitume incorporé au béton bitumineux vieillit sous l'action de l'oxygène de l'air et des agressions climatiques et mécaniques, ce qui entraîne une désagrégation plus ou moins rapide de la couche de surface. Ce vieillissement dû à une évolution de sa composition chimique se traduit par une augmentation de la teneur en asphaltène accompagnée d'une diminution de la teneur en résine et par une exsudation d'huiles plastifiantes : il y a durcissement du bitume

La correction du liant vieilli consiste à réincorporer, sous forme d'émulsion ou sous forme directe, des huiles aromatiques plastifiantes de rajeunissement.

Cette méthode a parfois donné des enrobés instables sujets au fluage et à l'ornièrage ou à des enrobés glissants par exsudation partielles des huiles de régénération. Pour ces raisons, on préfère actuellement recourir aux méthodes de recyclage en place ou en centrale.

4.2. Le recyclage en place :

Il consiste en un traitement en place d'enrobés bitumineux, par chauffage, scarification du revêtement, malaxage avec les correctifs nécessaires et remise en œuvre du mélange.

Il est réalisé à l'aide de machines dérivées des machines spécifiques de thermorégénération qui exécutent dans l'ordre indiqué les opérations suivantes :

- Préchauffage de la chaussée au moyen d'une machine équipée de panneaux vibrants ;
- Chauffage de la chaussée par la machine elle-même ;
- Scarification et mise en cordon dans l'axe de la machine de l'enrobé décohésionne ;
- Malaxage de l'enrobé ancien avec l'enrobé ou (et) l'agent correcteur ;
- Répandage au profil souhaité du « mélange obtenu » ;
- Compactage au moyen d'un atelier habituellement utilisé pour l'épaisseur traitée.

La puissance de chauffe accrue par rapport à la thermorégénération (préchauffage) permet un décohésionnement par scarification sur une profondeur de 5 à 6 cm. L'enrobé d'apport passe par une trémie tampon et est acheminé par le malaxeur par un convoyeur à débit réglable fixant la proportion d'apport dans le mélange final. Une fois réglé, le convoyeur est asservi à l'avancement de la machine, qui conditionne le volume d'enrobé décohésionné entrant dans le malaxeur.

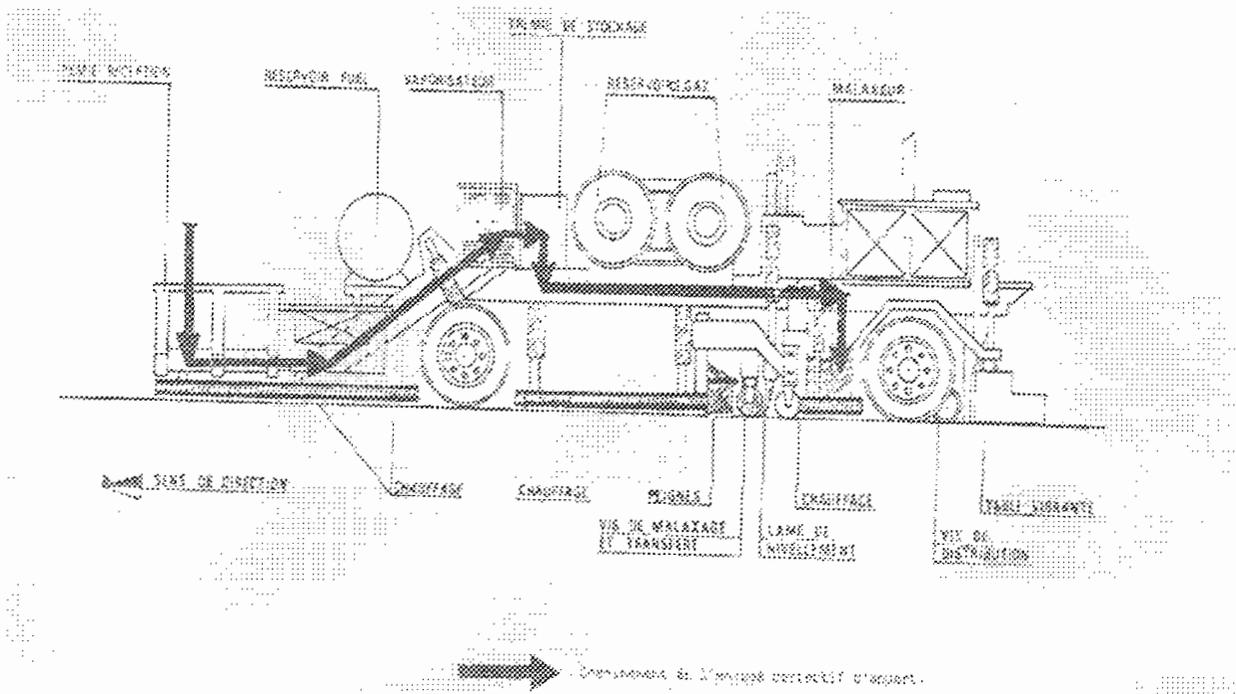


Figure 4.3.: schéma d'une machine de thermorégénération

L'ensemble est mélangé dans ce malaxeur à double arbre horizontal, puis mis en œuvre par une vis de répartition et une table analogue à celle d'un finisseur.

La machine peut éventuellement être équipée d'une pompe doseuse permettant d'introduire dans le malaxeur un liant correcteur destiné à compenser le vieillissement du bitume en place.

Ainsi il n'y a plus deux couches successives comme en thermorégénération, mais une seule couche de roulement d'épaisseur légèrement plus forte qu'avant traitement.

Cependant, les possibilités réelles de correction de la formulation des enrobés sont limitées car toute action sur le dosage en granulats par exemple, influera sur le dosage en liant et vis versa. En particulier, si dans l'enrobé à traiter, seul le bitume a vieilli sans qu'aucune correction granulaire ne soit nécessaire, il ne sera pas possible d'apporter du bitume neuf en quantité suffisante sous peine de provoquer une teneur excessive en liant et par suite des ressuyages.

4.2.1. Etude détaillée du recyclage à chaud in situ (thermorecyclage) :

La réutilisation ou le recyclage du vieil asphalte n'est pas un concept « nouveau », puisque les matériaux asphaltiques récupérés des chaussées sont recyclés aussi bien à chaud qu'à froid, depuis au moins le début du 20^{ème} siècle (ARRA, 2001). La technologie et le matériel de recyclage de l'asphalte ont toute fois peu progressé jusqu'aux années 1970, lorsque, aiguillonnés par la crise énergétique, les efforts en matière de recyclage du bitume ont augmenté en réaction aux pressions sociales et environnementales visant à faire diminuer la demande pour les produits fabriqués à l'aide de combustibles fossiles ou d'hydrocarbures pétroliers non renouvelables.

L'utilisation de chaussées asphaltiques récupérées (CAR) pour produire un enrobé à chaud recyclé est une pratique bien établie et elle continue de croître partout dans le monde et dans des pays comme le Canada qui en est un des précurseurs. En outre, les progrès continus réalisés dans le domaine des techniques de recyclage, notamment la thermorégénération, ainsi que leur mise en pratique avec succès et leurs performances positives sans cesse croissantes, offrent aux gestionnaires de chaussées un plus grand nombre de choix rentables et techniquement acceptables en matière de réutilisation ou de recyclage relativement aux travaux d'entretien ou de réhabilitation des chaussées.

Le recyclage du bitume est devenu un élément clé dans l'industrie routière et il est essentiel d'adopter la technologie appropriée pour s'assurer d'obtenir la qualité de chaussée

souhaitée ; il est également essentiel d'évaluer les propriétés des matériaux de recyclage pour faire en sorte que le problème qu'on est entrain de corriger ne se répète pas.

En thermorégénération, la surface du vieux revêtement en bitume est chauffée, amollie et scarifiée sur une épaisseur variant entre de 20 à 60 mm , le matériau scarifié est ensuite remalaxé, mis en place et compacté dans le cadre d'un procédé en place continu. On peut aussi ajouter de nouveaux granulats, du nouveau ciment bitumineux, des agents de recyclage ou des agents amollissants, ou un adjuvant pour améliorer les propriétés mécaniques du revêtement existant et augmenter sa capacité structurale (dans le cas d'une épaisseur totale de traitement pouvant atteindre 75 mm).

Les dégradations de chaussée qu'il est possible de traiter par thermorégénération incluent : le ressuage, l'arrachement, l'orniérage, les bourrelets, la mauvaise adhérence (macrotexture et microtexture), la fissuration longitudinale ou transversale et les remontées de fissures.



Figure 4.4. : Chaîne de recyclage en place par thermorégénération en train de réhabiliter une chaussée municipale en une seule passe.

Trois préchauffeurs à chaleur rayonnée de faible intensité et à soufflerie d'air chaud mènent la chaîne de thermorégénération (côté gauche de la photo), suivis par la réchauffeuse-fraiseuse ; le nouvel EPC est chargé dans une trémie à l'avant de l'appareil de recyclage en place, où il est alimenté et mélangé au matériau du revêtement existant, puis réparti par la

finisseuse. On utilise du matériel de compactage d'EPC classique pour compacter simultanément le mélange obtenu par thermorégénération.

Il existe trois types traitement par thermorégénération :

- **Recyclage en surface** : pour améliorer le profil d'une couche de roulement en asphalte déformée par l'orniérage ou l'usure, mais en état comparativement non vieilli et présentant que des fissures mineures (aucun rajeunissement requis).
Le recyclage en surface consiste à chauffer, à scarifier, à niveler, à reprofiler et à compacter le mélange.
- **Recyclage en place** : pour améliorer la qualité d'une vieille surface de roulement fissurée en y ajoutant un agent de recyclage ou un produit régénérateur, un granulat ou un nouvel enrobé préparé à chaud. Le recyclage en place entraîne le chauffage, la scarification (avec malaxage des granulats et ajout d'un produit régénérateur ou d'un nouvel enrobé préparé à chaud), le malaxage, le nivelage, le reprofilage et le compactage.
- **Pose d'un nouveau revêtement** : pour améliorer le profil d'une surface de roulement en asphalte sérieusement déformée par l'orniérage ou l'usure, améliorer les caractéristiques d'adhérence ou procurer un certain renforcement. La pose d'un nouveau revêtement entraîne le chauffage, la scarification (avec l'ajout au besoin d'un produit régénérateur, de granulat ou d'un nouvel enrobé préparé à chaud), le reprofilage et le compactage le tout en une seule passe.

La présente partie vise à la présentation et à l'étude de la technique à savoir :

- Le principe de mise en œuvre et les matériels utilisés ;
- Les études de reconnaissance du site ;
- Les domaines d'emploi ;
- Les conditions de mise en œuvre et de contrôles ;
- Les performances attendues ;
- Les avantages sur le plan économique et environnemental ;
- Les précautions et les limites d'emploi ;
- Le devenir de la technique.

4.2.2. Principes et Matériels :

Le retraitement des enrobés en place qu'ils soient décollés de leur support, fissurés ou ornières consiste à :

✚ Elever la température du revêtement bitumineux et à la maintenir avant décohésionnement au moyen d'un ensemble de préchauffeuses équipées de grandes surfaces de panneaux radiants. La surface de chauffe minimale est de 175 m² à 200 m², elle doit être portée à 250, voire à 300 m² selon l'épaisseur à traiter et les conditions météorologiques.

La vitesse d'avancement du train de chauffe est comprise entre 2 et 6 mètres par minute et doit être adaptée selon les conditions pour avoir une température à l'interface du support supérieure à 80 ° C.

✚ Décohésionner l'enrobé et selon le matériel, à le mettre en cordon dans l'axe de la machine ou à le maintenir en place puis acheminement de l'enrobé chaud par un vis sans fin dans le malaxeur ;

✚ Malaxer l'enrobé ancien (chaud) avec les correctifs et ajouts nécessaires ;

✚ Répandre au profil souhaité le mélange obtenu à l'aide d'une table ou un finisseur ;

✚ Compacter au moyen d'un atelier traditionnel adapté à l'épaisseur traitée. La pose de l'enrobé recyclé se fait à l'arrière de la machine.

Les matériels utilisés sur le marché français se différencient essentiellement par le système de malaxage.

4.2.3. Les études de reconnaissance :

Quel que soit le problème à résoudre, une reconnaissance préalable du site est nécessaire. Pour mener à bien cette reconnaissance, le formulateur se doit de rechercher les informations concernant le matériau à traiter (formules, caractéristiques des matériaux, contrôles) et, ce, afin de faire un découpage en zones homogènes de composition, ou de mettre en évidence les points singuliers.

La caractérisation des matériaux en place s'effectue à partir d'échantillons prélevés, soit par carottage, soit par plaques découpées dans l'enrobé, dans l'axe de la voie, s'il s'agit d'ornièrage.

L'étude de retraitement consiste en fonction des caractéristiques des matériaux prélevés à déterminer les paramètres du retraitement :

- profondeur ;
- nature et pourcentage d'ajouts.

L'épreuve de formulation a pour objectif de caractériser le produit après le recyclage en vérifiant à partir de quelques essais que l'on obtient bien les spécifications demandées.

S'il s'agit d'orniérage, il n'est pas toujours nécessaire de traiter toute la chaussée, mais par exemple un seul sens, ou la voie lente uniquement.

S'il s'agit d'un problème de fissuration, il est possible, voire nécessaire, en sus du traitement de l'enrobé, de mettre en œuvre une nouvelle couche de roulement.

4.2.4. Domaines d'emploi :

Le retraitement en place est utilisé dans le cas de chaussées très dégradées et affectées par un problème se situant dans la partie supérieure de la chaussée (fissures transversales soulevées et multiples, carrelage, nids de poule et pelade). Cette technique est généralement utilisée lorsque le taux de fissuration est supérieur à 0,25 m/m² et/ou que plus de 20 % de la surface de la chaussée est fissurée.

Cette technique permet de restaurer les couches de surface. Elle s'applique à des chaussées bien dimensionnées dont les champs d'applications sont les suivantes :

- ✦ Recoller une couche de surface épaisse à son support. Si la couche est trop épaisse, on procède à un fraisage préalable de manière à retraiter l'épaisseur compatible avec la capacité de recyclage de la machine, pour reprendre l'interface et la partie supérieure de l'enrobé support (1 à 2 cm) ;
- ✦ Effacer la fissuration provoquée par vieillissement du liant des couches de roulement des chaussées routières et aéroportuaires, par régénération des caractéristiques du liant ;
- ✦ Restaurer l'uni transversal (et longitudinale) d'une chaussée orniérée par fluage, par incorporation selon les besoins dans le mélange :
 - de gravillons prélaqués ;
 - de bitume pour compenser le brûlage et la baisse de teneur en liant due à l'ajout de gravillons ;
 - d'autres additifs à définir lors de l'étude de formulation ;
- ✦ recycler des couches de roulement de type BB mince, ou BB drainant avec l'ajout de liant polymère afin de retrouver les caractéristiques de l'enrobé d'origine ;

- ✚ obtenir par apport d'un mortier bitumineux riche en sable et en liant polymère, éventuellement apport de fibres et homogénéisation à chaud sur 2 cm avec l'enrobé existant, une couche anti-fissure dans le cas de chaussées semi-rigides à recouvrir par une nouvelle couche de roulement en BBTM.

4.2.5. Conditions de mise en œuvre et contrôles :

Les rendements varient de 5 000 à 10 000 m² par jour ; la vitesse d'avancement est comprise entre 2 et 6 m/min, elle dépend de l'épaisseur traitée (déconseillée au-delà de 7 cm), et de l'éventuelle présence d'eau dans la couche à traiter (interface).

Les largeurs utiles peuvent aller de 2.50 à 4 m, lorsque l'entreprise dispose de préchauffeurs réglables, de décohesionneuses et de tables de finisseurs extensibles.

Les contrôles d'exécution consistent à vérifier :

- ✚ l'épaisseur du retraitement ;
- ✚ les températures d'interface (supérieure à 80° C) et de l'enrobé recyclé derrière la décohesionneuse ;
- ✚ les dosages en granulats, liants et ajouts ;
- ✚ la vitesse d'avancement ;
- ✚ sur le produit fini, il est nécessaire de vérifier le respect de la composition, le collage au support (carottages), l'efficacité du compactage (% de vides) ;
- ✚ les caractéristiques de surface : uni longitudinal et macrotecture doivent être vérifiés comme pour toute couche de roulement.

4.2.6. Performances attendues :

Les surfaces traitées depuis une quinzaine d'années permettent de faire un premier bilan de cette technique qui figure en bonne place dans la panoplie des techniques mises à disposition par les entreprises auprès des gestionnaires.

Cette technique est généralement mise en œuvre pour effacer ou corriger des défauts de surface : décollement, fissuration, fluage. Bien que l'étude de formulation conduise à un matériau dont les spécifications soient conformes aux objectifs, cette technique présente quelques points sensibles :

- *au niveau thermique* : les températures du mélange dépassent rarement les 130° C et sont aussi rarement supérieures à 100° C entre 6 et 7 cm.

Pour obtenir les températures recommandées (130° C pour le mélange), il est préférable de multiplier le nombre de préchauffeuses, plutôt que de réduire la vitesse de la machine et ce afin d'éviter les brûlages et le survieillissement ;

- *au niveau homogénéité*, et, ce, quel que soit le mode de malaxage, les prélèvements effectués derrière le finisseur font apparaître :
 - des dispersions des teneurs en liant supérieures à celles constatées sur enrobés neufs généralement liées à l'hétérogénéité de l'enrobé à recycler et aux conditions d'exécution ;
 - l'absence d'évolution significative de la granularité hormis le pourcentage de fines plus élevé que l'enrobé d'origine.

Le recollage des couches est généralement efficace. Il peut cependant être altéré par la présence d'eau à l'interface, les conditions météorologiques lors des travaux, une mauvaise appréciation de l'interface et parfois une capacité de chauffe insuffisante ;

Les caractéristiques de surface mesurées dans le cas où l'enrobé thermorecyclé n'est pas recouvert, montrent que :

- les macrotextures relevées sur BBSG recyclé sont du même type mais avec des dispersions plus élevées ;
- l'uni longitudinal respecte globalement les spécifications.

Un des points clé de cette technique est la phase étude, elle permet de définir les ajouts nécessaires et indirectement de mieux maîtriser les variations relatives du dosage des divers constituants.

Plus que toute autre technique, le retraitement par thermorecyclage nécessite des équipes de mise en œuvre bien rodées et des contrôles adaptés : granularité, teneur en liant, caractéristiques du bitume, pourcentages de vide et caractéristiques de surface.

Il faut veiller particulièrement aux zones de démarrages génératrices de ségrégation et de risques d'arrachements.

4.2.7. Avantages :

Au plan économique

La technique du thermorecyclage présente certains avantages :

- réaliser plusieurs opérations en une seule : chauffage, acheminement, malaxage, et pose ;

- la facilité et la vitesse d'exécution ;
- la préservation des propriétés de l'enrobé ;
- l'excellente qualité de roulement du revêtement obtenu ;
- Réutilisation optimale des matériaux en place ;
- Réalisation d'une assise plus homogène ;
- Modification minimale des profils longitudinaux ;
- Amélioration de la tenue au gel de la chaussée ;
- Minimisation des impacts aux usagers ;
- Plus économique que la reconstruction.

Au plan économique la réutilisation ou le recyclage des enrobés bitumineux sont bien connus. Les granulats recyclés ont tendance à être moins coûteux que les granulats naturels, surtout lorsque le coût de la transformation est porté en déduction du coût substantiellement plus élevé de l'élimination. Lorsqu'il est bien transformé et incorporé dans les utilisations appropriées, le produit recyclé peut se comporter mécaniquement de la même façon que le revêtement initial.

En effet, trois raisons expliquent les économies substantielles autorisées par l'efficacité et l'efficacité du procédé de recyclage à chaud des enrobés bitumineux in situ par :

- aucune ou pratiquement aucune nécessité d'acheter du bitume ou des granulats d'apport;
- possibilité de limiter la réfection aux zones les plus dégradées;
- aucune nécessité de déplacer des barrières ni de modifier les bordures de la chaussée.

Appliqué en temps opportun, ce procédé constitue un moyen rentable de remise en état des chaussées.

Au plan environnemental

Ce procédé est en outre le plus écologique des procédés de réfection de revêtements bitumineux.

Le recyclage des enrobés peut être considéré comme favorable à l'environnement en ce sens que les enrobés auraient pu être mis en décharge ; ce qui pourrait être néfaste à l'environnement. Cependant il faut s'affranchir des risques de rejets à l'atmosphère de particules hydrocarbonées et de composés organiques néfastes à l'environnement.

A l'origine de la technique, les expérimentations de suivi concernaient exclusivement les caractéristiques des enrobés recyclés et le comportement sur le site. L'aspect

environnement consistait à respecter le seuil d'émission de particules solides ($<150\text{mg/m}^3$). Actuellement on peut penser d'une manière générale que les enrobés fabriqués et mis en œuvre avec les moyens modernes satisfont aux exigences en matière d'émissions polluantes.

4.2.8. Précaution et limite d'emploi :

Cette technique présente, lors de la réalisation, le risque de dégagement de vapeurs et fumées et nécessite donc une attention et une signalisation particulières pour éviter tout risque d'accident.

Quoi qu'on dise, comme toutes les techniques, le recyclage à chaud en place (thermorecyclage) comporte quelques inconvénients : matériau potentiellement recyclable requis, coût du matériel élevé...

4.2.9. Devenir de la technique :

Le thermorecyclage est source d'économie de matières premières : granulats et bitume. Par réutilisation « in situ » de toute l'épaisseur de la couche à rénover, il contribue donc indirectement à la sauvegarde de l'environnement. Les conditions économiques et les progrès techniques réalisés ces dix dernières années montrent que ce type de technique offre des possibilités intéressantes pour les gestionnaires routiers, d'autant que l'amélioration permanente du matériel devrait apporter l'homogénéité souhaitée.

Si son créneau d'utilisation est le recyclage des couches épaisses de BBSG (6 à 7 cm), les expériences réalisées par les entreprises (en France) pour élargir le domaine d'emploi (recyclage des BBTM, BBDr) sont en cours de mise au point et font l'objet de chartes à l'innovation.

Le thermorecyclage s'inscrit dans une stratégie globale d'entretien des réseaux routiers en permettant d'accroître la durée de service des couches de roulement (celle-ci peut être doublée) pour un coût intéressant et en sauvegardant l'environnement.

Elle ne peut être envisagée que pour des surfaces à traiter importantes (généralement supérieure à $50\,000\text{ m}^2$), compte tenu des rendements journaliers qui peuvent atteindre 8 à $10\,000\text{ m}^2/\text{jour}$ en 4 m de largeur, lorsque les conditions météorologiques sont favorables.

Sur le plan économique, une couche de roulement présentant des désordres graves et nécessitant une opération lourde d'entretien (recouvrement ou fraisage et remplacement) peut, après thermorecyclage, être différée de plusieurs années et ce pour un coût équivalent à un revêtement en BBTM selon les surfaces à retraiter.

Très appréciée par les autoroutiers par sa souplesse d'intervention (chantiers pouvant se réaliser de nuit avec mise en place et évacuation rapide du matériel), cette technique est majoritairement utilisée actuellement pour corriger les voies lentes ornierées.

Dans le chapitre suivant on parlera de l'utilisation du recyclage dans l'entretien des chaussées bitumineuses.

Chapitre V UTILISATION DES MATÉRIAUX RECYCLÉS DANS L'ENTRETIEN DES CHAUSSÉES FLEXIBLES

La plupart des techniques d'entretien utilisées au Sénégal sont très rudimentaires. Elles ont pour conséquence des chaussées dont la surface ne respecte pas les conditions requises : défaut d'uni, de pente transversale etc. Ceci réduit considérablement le confort et la sécurité de la chaussée mais aussi la durée de vie des véhicules.

En plus de ces défauts, il se pose un problème de durabilité car la plupart des chaussées entretenues nécessitent des interventions au bout d'un an. Tous ces facteurs ont un impact négatif sur l'économie nationale vu les sommes énormes investis dans l'entretien (bouchage des nids de poule)

En outre, lors de la réhabilitation de certaines routes, les enrobés des anciennes pistes sont laissés à la nature et peuvent nuire à l'environnement.

Face à tout ceci, il serait temps de penser à des techniques plus évoluées qui ont fait leur preuve depuis plus de 20 ans en Europe, en Amérique du nord et au Japon. Elles permettent de régler à la fois les problèmes de surface et d'environnement, et de manière durable. Elles sont aussi source d'économie d'argent et de matériaux. Il s'agit du recyclage des vieux enrobés in situ.

5.1. Quelques types d'entretien :

5.1.1. Entretien préventif :

L'entretien préventif est la stratégie planifiée d'application de traitements rentables qui permet de préserver un réseau routier et ses installations, d'en retarder la dégradation future et d'en entretenir ou d'en améliorer la durabilité à l'usage (sans en accroître la capacité structurale) (U.S. Federal Highway Administration, 2000).

5.1.1.1. Généralités :

L'entretien préventif de la chaussée vise à corriger les problèmes mineurs avant qu'ils n'exigent des réparations plus coûteuses. En ralentissant la vitesse de détérioration, un traitement peut effectivement prolonger la vie utile de la chaussée. Néanmoins, on néglige souvent la pratique qui consiste à reconnaître systématiquement les chaussées qui

bénéficieraient le plus d'un entretien préventif et à appliquer le traitement approprié au moment opportun.

Pour qu'un programme d'entretien préventif soit rentable, il faut appliquer le bon traitement au bon moment. L'objectif consiste à repérer les tronçons qui profiteraient le plus d'un entretien préventif, à procéder à ce repérage au moment opportun et à choisir le traitement le plus avantageux.

Le traitement d'entretien préventif dont l'application prévient la détérioration précoce de la chaussée ou retarde la progression des imperfections, vise à ralentir la vitesse à laquelle la chaussée se détériore et à augmenter efficacement la vie utile de la chaussée. Il doit être appliqué lorsque la chaussée est encore relativement en bon état et ne présente aucun dommage structural (U.S. Fédéral Highway Administration, 2000). Voici quelques exemples de traitement d'entretien préventif :

- Le détournage et l'obturation des fissures visant à empêcher l'eau de pénétrer dans la structure de la chaussée;
- Le liage des fissures dans une chaussée en béton de ciment dans le but de rétablir le transfert de charges;
- L'application d'un tapis d'enrobés mince dans le but d'empêcher les chaussées dont le revêtement est ouvert et poreux de se détériorer plus rapidement.

On applique habituellement les traitements d'entretien préventif sur les chaussées en bon ou en excellent état. L'entretien préventif n'a aucune chance de réussir après l'apparition de dommages structuraux.

La *figure 5.1.* illustre l'effet attendu d'un traitement d'entretien préventif. La courbe qui indique la modification de l'état de la chaussée au fil du temps s'appelle la « Courbe de rendement de la chaussée ». On applique habituellement les traitements d'entretien préventif sur des chaussées en relativement bon état. Sur une échelle de 0 à 100, le chiffre 100 représentant une chaussée neuve, on applique habituellement le premier traitement d'entretien préventif avant que l'état de la chaussée ne passe sous 70. La *figure 5.1.* illustre également l'incidence d'un traitement d'entretien préventif sur la prolongation de la vie de la chaussée.

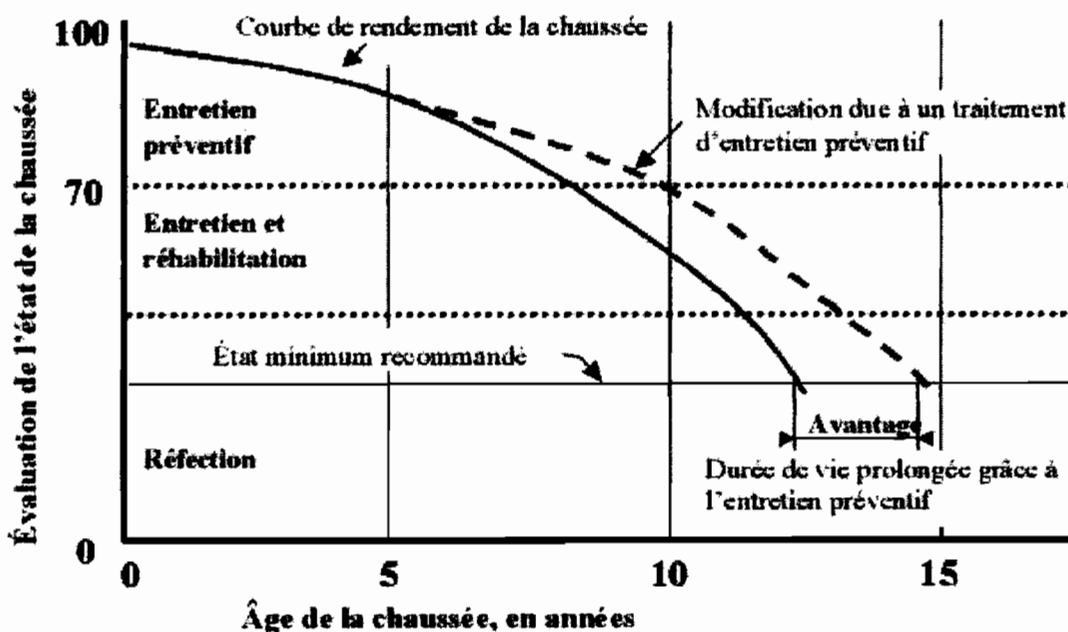


Figure 5.1 : Avantages de l'entretien préventif pour la prolongation de la vie de la chaussée.

5.1.1.2. Éléments d'un programme d'entretien préventif :

Les effets bénéfiques des traitements d'entretien préventif dépendent des caractéristiques de la structure de la chaussée, du type et de l'étendue des dégradations, et de certains autres facteurs, tels que le drainage et les matériaux. Pour que l'entretien préventif soit rentable, il faut appliquer le bon traitement à la bonne chaussée au bon moment.

Il est donc nécessaire d'établir des procédures servant à recenser les tronçons qui bénéficieraient le plus d'un entretien préventif (la bonne chaussée), à cerner les besoins d'entretien préventif en temps opportun (le bon moment) et à choisir le traitement le plus avantageux (le bon traitement).

5.1.1.2.1. La bonne chaussée :

On doit faire l'inventaire de tous les tronçons de la chaussée et en examiner l'état pour repérer la bonne chaussée. Les examens de l'état de la chaussée qui permettent de déterminer le type, l'importance et l'étendue des dégradations font habituellement partie intégrante des systèmes de gestion et sont un élément essentiel de tout programme d'entretien préventif. Toutefois, en ce qui a trait à l'entretien préventif, il faut aussi repérer toute condition particulière et chercher à reconnaître les indicateurs précoces qui signalent la nécessité d'exécuter des travaux d'entretien préventif.

L'examen de l'état des chaussées doit permettre de reconnaître les dégradations liées aux prémisses de base de l'application d'un entretien préventif, dont on a déjà donné les grandes lignes, et aider à repérer les tronçons qui bénéficieraient le plus de ce type d'entretien.

5.1.1.2.2. Le bon moment :

On doit appliquer les traitements d'entretien préventif avant que les dégradations ne progressent et aient une incidence sur la tenue et la vie de la chaussée, en plus de nécessiter un traitement curatif plus coûteux. On devrait par exemple procéder au détournement et à l'obturation des fissures dans une chaussée en béton asphaltique avant que des fissures transversales simples se transforment en fissures multiples. Comme on le suggère dans la *figure 5.1.*, on applique habituellement les traitements d'entretien préventif durant les premières étapes de la vie de la chaussée.

Il faut extrapoler dans l'avenir l'état de la chaussée relevé au moment de l'examen, puisqu'il est impossible d'appliquer le traitement préventif immédiatement. On planifie habituellement ce genre de traitement de 2 à 18 mois à l'avance.

5.1.1.2.3. Le bon traitement :

Le choix du bon traitement nécessite les quatre phases suivantes :

- La détermination des traitements possibles;
- Le choix du traitement pour chaque tronçon;
- Les besoins et les priorités relatifs aux autres tronçons du réseau;
- Le choix des méthodes et des matériaux de construction.

5.1.2. Entretien courant :

L'entretien courant comprend toutes les opérations au jour le jour effectuées par une équipe affectée en permanence à ces activités, et faisant surtout appel à des procédés manuels utilisant des outils simples.

5.1.2.1. Réparation des nids de poule :

On effectue d'abord une excavation approfondie en fonction de la cause des dégradations en éliminant tous les matériaux défectueux. Elle sera aussi agrandie de 20 à 30cm et ses rebords seront avivés. Enfin elle sera soigneusement balayée.

Après pulvérisation d'une couche d'accrochage sur les parois, la cavité est remplie de couches successives de matériaux de calibres décroissants. On effectue une pulvérisation de liant sur chaque couche de matériaux et on termine par deux couches successives de matériaux.

Un cylindrage terminal avec un rouleau vibrant 500 à 800kg, ou l'utilisation d'une petite dame sauteuse permettent d'augmenter la compacité de l'ensemble. Si la réparation est profonde, un compactage intermédiaire est utile.

5.1.2.2. Reprofilage :

Il s'agit de redonner à la chaussée un profil en travers correct (pour évacuer l'eau) et un profil en long régulier (pour sécuriser et améliorer le confort des usagers), généralement par apport de matériaux.

Il nécessite tout d'abord un repérage, puis un accrochage (l'émulsion, si le BB est chaud, est préférable à toute autre technique). Le choix du matériau dépend de l'épaisseur à reprofiler, du trafic et du linéaire. Ensuite viennent les étapes de répardage et de compactage (intense). Elles sont suivies par une étape de vérification de la pente (2 à 5 % maxi) ; si la surface doit être encore traitée, on procède par scellement. L'opération se termine par un drainage.

5.1.2.3. Scellement des fissures (pontage, colmatage) :

Il s'agit d'une technique d'obturation des fissures visant à les rendre étanches. Trois principales techniques existent.

La première est la pénétration : elle consiste à introduire par gravité un liant fluide dans le corps de la chaussée.

La deuxième est le garnissage : elle consiste à couler un produit d'étanchéité dans une réservation (cas des joints de chaussée en béton de ciment).

La dernière est le pontage : il consiste à épandre un mastic en faible sur-épaisseur à cheval sur la fissure.

5.1.2.4. Traitement des ressuges :

Cette opération vise à supprimer les effets néfastes (problèmes de glissance par temps de pluie et de collage des pneumatiques par temps de fortes chaleurs) liés à la présence de

l'excès de bitume à la surface de la chaussée, en réincorporant des gravillons dans l'excès de liant.

Une première technique est le cloutage: il consiste en un gravillonnage à sec, puis en un enchâssement par cylindrage.

Une deuxième technique est le grenailage : il consiste en un bombardement du revêtement par des billes d'acier, ce qui entraîne une « décohésion » du film de liant en excès; la chaussée recouvre alors une rugosité satisfaisante.

Une troisième technique est le brûlage : elle consiste à réduire le liant en excès par choc thermique à la lance (chalumeau ou gaz), puis à épandre des gravillons et à les enchâsser par cylindrage.

Une quatrième technique consiste à avoir recours aux méthodes thermo.

5.1.3. Entretien périodique :

L'entretien des chaussées souples comprend les opérations ayant pour objet la réparation rapide des dégradations localisées, qui sont groupées sous l'appellation « point à temps » et, d'autre part, les revêtements généraux exécutés périodiquement.

L'application périodique d'un revêtement général constitue ou devrait constituer le poste principal du budget d'entretien des routes revêtues. Ce revêtement est en général un enduit superficiel réalisé en appliquant successivement une ou plusieurs couches d'un liant hydrocarboné et de gravillons. Il peut s'agir aussi d'un sable enrobé, d'un coulis bitumineux ou d'enrobés denses. Les deux premiers nécessitent trop de soins et, pour des rendements appréciables, un matériel trop important pour être exécutés en régie. Quant aux enrobés denses, leur coût élevé les fait déconseiller.

Quelque soit le type de revêtement d'usure retenu, son application doit toujours être précédée d'une inspection minutieuse de la chaussée, de la vérification de l'ensemble du système d'assainissement et d'une campagne d'emplois partiels pour la réparation des défauts et dégradations localisées. Si ce revêtement est un enduit superficiel ou un coulis bitumineux, les emplois ne devront pas seulement permettre de supprimer les nids de poule, mais encore de rétablir un profil correct. Ils devront être particulièrement soignés.

5.1.3.1. Point à temps :

Le terme s'applique à l'ensemble des procédés de réparation des dégradations localisées de toute nature, lorsqu'elles sont trop importantes, pour être tolérées jusqu'à la prochaine campagne de revêtements généraux. Il convient donc de diagnostiquer la cause réelle des désordres et de s'efforcer d'y apporter le remède approprié.

Le point à temps peut être exécuté à l'aide de matériaux de diverses granularités, agglomérés en place au moyen de liants hydrocarbonés, ou au moyen de matériaux préalablement enrobés plus ou moins longtemps à l'avance. Ces matériaux doivent présenter l'ensemble des qualités requises pour l'exécution des enduits superficiels.

Le liant sera du cut-back fluide ou une émulsion. Celle-ci présente l'avantage d'être plus facile à mettre en œuvre à froid. On choisira de préférence une émulsion cationique, qui s'accommode de tous les matériaux, mêmes acides, et peut être répandue par temps incertain.

5.1.3.2. Réparation des dégradations de surface :

Il s'agit de réaliser un enduit localisé en évitant le surdosage qui se traduit fréquemment par des ressuyages et la formation de plaques glissantes. Pour cela on inverse l'ordre normal des opérations et on procède en premier lieu, à un gravillonnage léger au moyen de granulats 5/8.

On répand ensuite le liant. Enfin, on applique une couche de gravillons 2.5/5. On termine parfois par une pulvérisation légère et l'on complète par un cylindrage au rouleau vibrant.

L'utilisation de matériaux de faible calibre et une double granularité permettent de limiter les risques d'arrachements et de projections par la circulation. Si nécessaire, il vaut mieux augmenter le nombre de couches qu'utiliser des agrégats plus gros.

La suppression des flaches peut être réalisée par le même procédé lorsque leur profondeur n'excède pas 2 à 3 cm. Un cylindrage terminal est indispensable.

5.1.3.3. Utilisation de matériaux enrobés :

Leur utilisation en point à temps permet de s'affranchir des sujétions de transport et de répandage de liant.

Cependant elle n'est valable que pour les emplois partiels sur revêtements et ils sont en général excessivement chers en Afrique.

Les matériaux sont, soit des enrobés ouverts ou semi-denses, stockables, soit des enrobés denses ou des sables enrobés.

Les premiers sont réalisés en général en centrale, mais ils peuvent l'être également à la subdivision ou près du chantier, à l'aide d'appareils à faible rendement, voire même de simple bétonnières. Il convient de prévoir deux calibres : 2.5/20 ou 2.5/16 pour le corps des réparations et 2.5/8 pour la couche de surface.

Certaines méthodes d'enrobage permettent d'obtenir des matériaux stockables pendant plusieurs mois. La mise en œuvre s'effectue sans pulvérisation préalable. Elle est particulièrement simple, mais lorsque l'on répand en plusieurs couches, il est essentiel d'attendre que chacune d'elle soit stabilisée avant d'entreprendre la suivante. Une mise en circulation après compactage est toujours souhaitable.

Les enrobés ouverts ou semi-denses sont perméables. Ils ne doivent être employés qu'avec précaution lorsque la couche de base ou la fondation risquent d'être sensibles à l'eau, à moins d'être revêtus par un tapis après un temps de séchage suffisant.

Les enrobés denses et les sables enrobés permettent d'obtenir une meilleure tenue des emplois partiels à la circulation, et présentent l'important avantage d'être imperméables. Mais leur fabrication nécessite en général des postes puissants et ils ne peuvent être utilisés que dans les quelques heures qui la suivent. Ils ne conviennent qu'aux abords des grands centres.

5.2. Utilisation des matériaux recyclés dans l'entretien :

L'utilisation des matériaux recyclés est une technique d'entretien et de réhabilitation des structures routières réalisée entièrement in situ à partir du gisement de matériaux que constitue l'ancienne chaussée.

Cependant des études préalables de la chaussée permettent de déterminer la faisabilité technique et économique de la solution recyclage.

L'objectif de ces études est d'évaluer les caractéristiques des matériaux à retraiter afin de proposer un type retraitement adapté.

En tout état de cause, une reconnaissance minimale de la chaussée est indispensable. De la qualité de réalisation dépendra la réussite du projet. Elle doit comporter les actions suivantes :

- La recherche de l'historique de la chaussée ;
- Une reconnaissance par sondage de la géométrie du gisement des matériaux à retraiter (profil en travers) ;
- Le prélèvement de matériaux à retraiter pour identification ;

- Une estimation de la portance du sol support ;
- Une évaluation des travaux préparatoires (assainissement) et les contraintes de chantier.

5.2.1. Description du procédé :

Il s'effectue en cinq étapes :

1. Recyclage de l'ancienne chaussée par pulvo-malaxage ;
2. Correction granulaire (si requise) ;
3. Apport de liant et malaxage ;
4. Mise en forme et compactage ;
5. Application de la couche de roulement ;

Cependant, si la granulométrie des matériaux en place et/ou l'étude du matériau pulvérisé ne respecte pas les exigences spécifiées (voir tableau ci-dessous), une correction sera nécessaire par ajout d'un matériau correcteur. Généralement une pierre concassée correspondant à la partie faible du fuseau.

Tamis (mm)	% passant
40.00	90-100
5.00	25-65
0.08	3-15

Tableau 5.1. : Exigences granulométriques minimales

5.2.2. Correction de la teneur en liant :

Une fois la granulométrie et la teneur en liant de l'ancienne chaussée connues à travers un essai Marshall, on peut calculer la correction en liant à apporter comme suit :

P_1 : Teneur en liant de la chaussée à l'origine (%) ;

P_2 : Teneur en liant actuelle de la chaussée donnée par l'essai Marshall (%) ;

P : Correction à apporter (%) ;

$$P_1 = K \times \sqrt[3]{\Sigma} \times \alpha$$

Où Σ est la surface spécifique conventionnelle en m^2/kg ;

$$\Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f$$

dans laquelle on a les pourcentages pondéraux des éléments :

- G, éléments supérieurs à 6.3 mm ;
- S, éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm ;
- s, éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm ;
- f, éléments inférieurs à 0.08 mm ;
- K est le module de richesse [2, 3];
- α un coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats si elle diffère de 2.65 g/cm³. Dans ce cas, on a :

$$\alpha = \frac{2.65}{\rho}$$

ρ est la masse volumique des granulats (g/cm³).

$$P = P_1 - P_2$$

(Cours de routes- couche de roulement – Georges JEUFFROY et Raymond SAUTEREY)

Chapitre VI ÉTUDE DE CAS : TRONÇON FATICK-KAOLACK

6.1. Présentation du tronçon étudié :

Le tronçon Fatick-Kaolack est long de 42 km. Les caractéristiques de la structure sont :

- Largeur de la route 10.20m ;
- Largeur de la chaussée 7.20m ;
- Largeur des accotements 2x1.50m ;
- Pente transversale du revêtement 2.50% ;
- Pente transversale des accotements 3% ;
- Revêtement en enrobés denses d'épaisseur : 7 cm ;
- Revêtement monocouche sur les accotements.

6.2. Description des essais réalisés sur le revêtement :

6.2.1. L'essai Marshall :

L'essai Marshall peut être utilisé pour les mélanges contenant du bitume et des agrégats ne dépassant pas 25 mm de grosseur maximale.

Les éprouvettes auront une hauteur d'environ 6.4 cm et un diamètre de 10 cm. Elles seront préparées et compactées en suivant une procédure prescrite. On détermine la densité et les vides pour l'éprouvette compactée et puis on la chauffe à 60°C pour les essais de stabilité et de fluage. L'éprouvette est placée dans une machine et on applique sur elle une charge à raison de 5 cm/min. La charge maximale enregistrée durant l'essai, en Newton (N), est désignée comme étant la stabilité Marshall. La déformation qui a eu lieu lors de l'application de la charge, de la charge nulle jusqu'à la charge maximale en unité de 0.25 mm est le fluage.

Les critères de l'essai Marshall sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Catégorie de circulation	Lourde		Moyenne		Faible	
Nombre de coups de compactage pour chaque face	75		50		35	
Propriété	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Stabilité (N)	3336		2224		2224	
Fluage (0.25 mm)	8	16	8	18	8	20
Pourcentage des vides couche de surface	3	5	3	5	3	5

Tableau 6.1. : Critères de l'essai Marshall

6.2.2. L'essai d'extraction :

L'essai d'extraction permet de déterminer la teneur en bitume du revêtement ainsi que la granularité.

On remplit la cartouche préalablement pesée et chauffée, avec l'enrobé bitumineux. On détermine le poids total et on introduit le tout dans le tube de l'extracteur. Le trichloréthylène boue et remonte sous forme de vapeurs dans le réfrigérant. Elle est refroidie et redescend sous forme de liquide dans le ballon. Le matériau est ainsi lavé et débarrassé du bitume. On arrête l'expérience lorsque le liquide passe du noir au clair.

On étuve et on pèse le tout. La différence avec le poids initial donne celui du bitume.

6.3. Résultats des essais réalisés sur le nouveau revêtement :

L'ensemble des résultats des essais sur l'enrobé sont donnés dans le tableaux suivants :

N° Echantillon	Linéaire PK	Densité apparente Epr. (T/m ³)	Densité réelle enrobé (T/m ³)	C Absolue (%)	% des vides	Stabilité Marshall (daN)	Fluage (mm)
1	6+256 au 6+375	2.600	2.693	96.5	3.5	2812	3.2
2	6+375 au 6+600	2.287	2.693	96.1	3.9	1466	3.7
3	6+600 au 6+883	2.599	2.693	96.5	3.5	1854	3.2
4	6+883 au 7+050	2.614	2.693	97.1	2.9	2346	3.3
5	7+050 au 7+525	2.603	2.693	96.7	3.3	2263	3.3
6	7+525 au 8+075	2.597	2.693	96.4	3.6	2321	3.0
7	8+075 au 8+425	2.614	2.693	97.1	2.9	2346	3.3
8	8+425 au 8+850	2.596	2.693	96.4	3.6	2431	2.7
9	8+850 au 9+175	2.596	2.693	96.4	3.6	2216	3.7
10	9+175 au 10+062.5	2.604	2.693	96.7	3.3	2033	3.5
11	10+062.5 au 10+700	2.593	2.693	96.3	3.7	2205	3.0
12	10+700 au 11+012.5	2.607	2.693	96.8	3.2	2185	3.7
13	11+012.5 au 11+425	2.619	2.693	96.3	2.7	2120	3.3
14	11+425 au 11+725	2.613	2.693	97.0	3	2185	3.3
15	11+725 au 12+425	2.594	2.693	96.3	3.7	1820	3.5
16	12+425 au 13+025	2.606	2.693	96.8	3.2	2337	3.2
17	13+025 au 13+575	2.595	2.693	96.4	3.6	2144	3.5
18	13+575 au 14+050	2.590	2.693	96.2	3.8	2062	3.3
19	14+050 au 14+400	2.597	2.693	96.4	3.6	1960	3.5

Tableau 6.2. : Essai Marshall

N° Echantillon	Linéaire PK	%b	k
1	6+256 au 6+375	4.85	3.34
2	6+375 au 6+600	4.90	3.36
3	6+600 au 6+883	5.00	3.42
4	6+883 au 7+050	4.70	3.24
5	7+050 au 7+525	5.00	3.42
6	7+525 au 8+075	5.10	3.60
7	8+075 au 8+425	4.70	3.24
8	8+425 au 8+850	4.80	3.27
9	8+850 au 9+175	4.85	3.32
10	9+175 au 10+062.5	4.85	3.30
11	10+062.5 au 10+700	4.90	3.39
12	10+700 au 11+012.5	4.92	3.34
13	11+012.5 au 11+425	4.85	3.29
14	11+425 au 11+725	4.90	3.36
15	11+725 au 12+425	4.90	3.35
16	12+425 au 13+025	4.80	3.33
17	13+025 au 13+575	5.00	3.46
18	13+575 au 14+050	4.90	3.40
19	14+050 au 14+400	5.10	3.48

Tableau 6.3. : Essai d'extraction

6.4. Exploitation des résultats :

Compte tenu des résultats fournis par les essais on peut déduire les valeurs moyennes de la stabilité Marshall, de la compacité Marshall, du fluage, du module de richesse et de la teneur en bitume.

Ainsi, on a les résultats suivants :

	Valeurs moyennes	spécifications
stabilité Marshall (daN)	2163	> 1000
compacité Marshall (%)	96.5	96 < c < 97
Fluage (mm)	3.33	< 4
module de richesse	3.36	3 < k < 4
% en bitume	4.90	5 < %b < 9

Tableau 6.4. : Comparaison des résultats des essais aux spécifications

Au vu de ces résultats, le matériau mis en place est conforme aux spécifications techniques.

La formule qui a été appliquée consiste à mélanger une partie de la couche de surface avec l'ancienne couche d'assise (latérite ciment) pour constituer la nouvelle couche de fondation. Ce qui revient à traiter la couche de fondation au bitume.

Le bitume étant un matériau hydrophobe, des problèmes pourraient survenir par rapport à la tenue de cette couche en cas d'infiltration des eaux, ce qui peut causer des dégradations précoces.

Ce pendant, une quantité de matériaux bitumineux importante a été trouvée au bord de la route, et nous avons tenté de faire l'analyse sur des échantillons.

En effet, les essais d'extractions faits sur ces échantillons donnent des résultats inexploitable. L'analyse des dégradations sur ce tronçon paraît impossible à trouver :

- on n'a pas trouvé les dégradations sur place (avant leur réparation) ;
- les résultats géotechniques qui nous ont été transmis sont conformes aux normes.

CONCLUSION

Pour l'entretien et la remise en état des chaussées, la tendance actuelle dans le monde est essentiellement la réutilisation des matériaux bitumineux existants.

Les contraintes environnementales pour une économie des ressources non renouvelables suggèrent la valorisation du gisement de ces matériaux dans les chaussées et de limiter l'apport de matériaux dits « nouveaux » dans l'entretien de ces chaussées.

Bien que très largement utilisées depuis très longtemps en Europe et en Amérique du nord, les techniques de recyclage restent méconnues dans nos pays. Ceci s'explique par le fait que ces techniques requièrent un matériel spécial assez coûteux et une expertise avérée. Mais l'expérience a montré que les résultats obtenus par le recyclage des vieux enrobés sont satisfaisants tant sur le plan économique que du point de vue de la qualité de l'uni de la nouvelle structure mais aussi sur le plan environnemental.

Dans cette optique, face aux énormes budgets déployés chaque année dans l'entretien et la réhabilitation du réseau routier national et les quantités importantes de matériaux issus des anciennes chaussées rejetés, une utilisation de cette technique serait justifiée. Sur la même lancée, les techniques élémentaires utilisées dans nos pays pour la réfection des routes dégradées qui aboutissent à une chaussée dont l'uni laisse à désirer, doivent pousser les professionnels du milieu à utiliser des techniques plus sophistiquées qui ont fini de faire leur preuve dans beaucoup de pays.

Le tronçon Fatick-Kaolack ne constitue pas dans le cadre de ce projet un bon exemple. En ce sens que l'ancien revêtement n'a pas été utilisé en couche de roulement. L'utilisation en couche de roulement de ce revêtement aurait permis de mettre en évidence l'économie escomptée et l'efficacité de cette nouvelle technique (recyclage des enrobés).

Une étude dans le futur de cette technique à travers un cas pratique serait utile pour définir réellement les coûts de cette technique qui certes est moindre par rapport aux méthodes utilisées actuellement dans nos pays.

Il est certes important de réfectionner des chaussées pour obtenir le meilleur état de réseau, mais ne serait-il pas plus judicieux et aussi capitale d'utiliser des techniques plus évoluées et plus efficaces ?

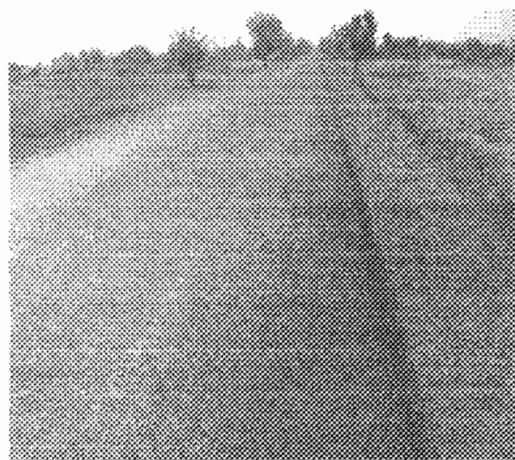
Nous sommes convaincus que l'utilisation des techniques de recyclage seraient un gain considérable pour les pays en voie de développement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

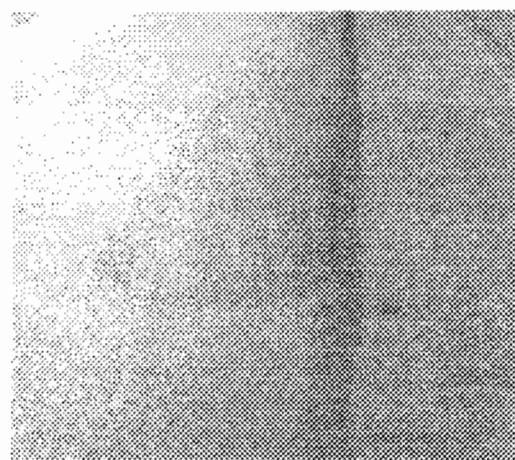
- [1] R. CROTTAZ et M.L. PIGOIS. Construction de la superstructure routière Tome I - Conception générale, dimensionnement, matériaux pierreux et stabilisations – Laboratoire de recherche des voies de circulation Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, avril 1978, 160 p.
- [2] Georges JEUFFREY et Raymond SAUTEREY. Couches de roulement, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1985, 162 p.
- [3] BCEOM – CEBTP. Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques, Tome 3 – Entretien et exploitation de la route, 1972, 395 p.
- [4] Oumar DIOUF et Khadim GUEYE. Etude du comportement et de dégradation des chaussées en béton bitumineux : Cas des dentelles de rive, Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur ESP, juillet 2005, 80 p.
- [5] Bigué MBOUP DIOP. Analyse critique de la stratégie d'entretien du réseau routier revêtu au Sénégal, Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur ESP, juillet 2004, 63 p.
- [6] Luc GAGNON. Techniques routières, Québec, Modulo Editeur, 1982, 245 p
- [7] SETRA (Service d'études techniques des routes et autoroutes). Guide technique Retraitement des chaussées et recyclage des matériaux bitumineux de chaussées, juillet 2004, 32 p.
- [8] Mariama CISSE et Aïcha Hafçatou TOURE. Contribution à la mise en œuvre d'une formulation optimale de béton bitumineux : Application aux concassés de basalte de Diack, Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur ESP, juillet 2003, 55 p.
- [9] Notes de cours de routes de Mr Soulève DIOM.
- wébographie :
- [10] science des matériaux de construction - Université Aboubekr BELKAID-faculté des sciences de l'ingénieur - département Génie Civil.
- [11] www.infraguide.ca, entretien préventif des chaussées.
- [12] Manuel d'identification des dégradations des chaussées flexibles - Québec.

ANNEXES

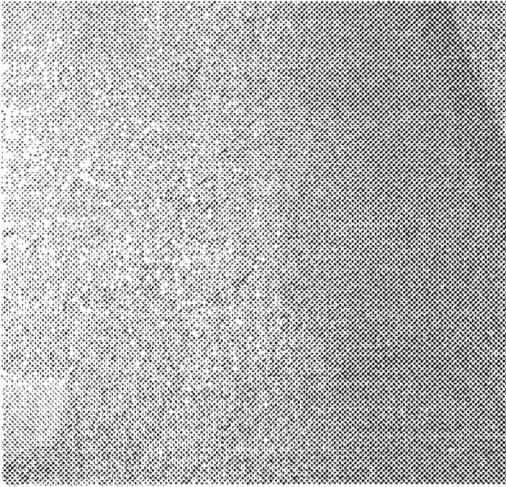
Les photos suivantes ont été prises sur le tronçon Fatick- Kaolack



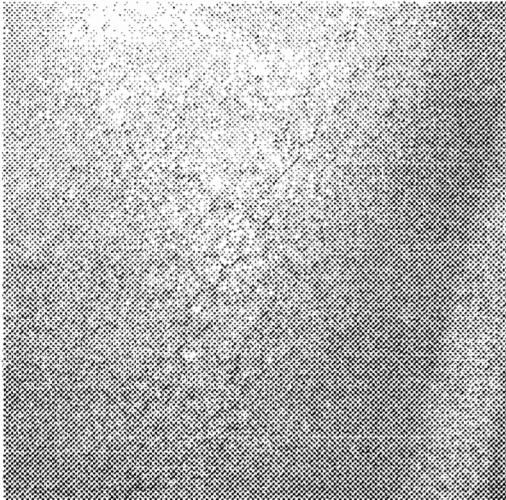
Couche de roulement après
réfection



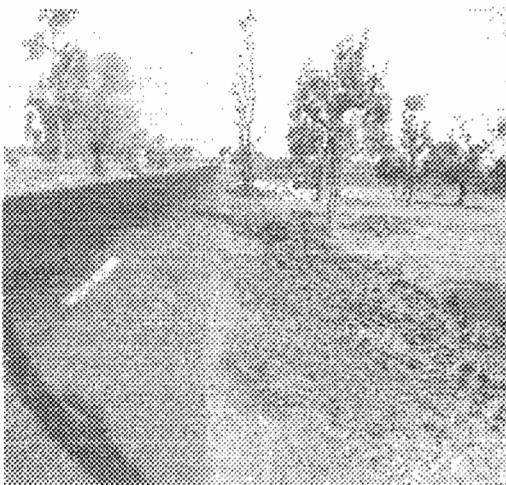
Couche de roulement après
réfection
(Défaut d'uni)



Surface de roulement un peu fissurée



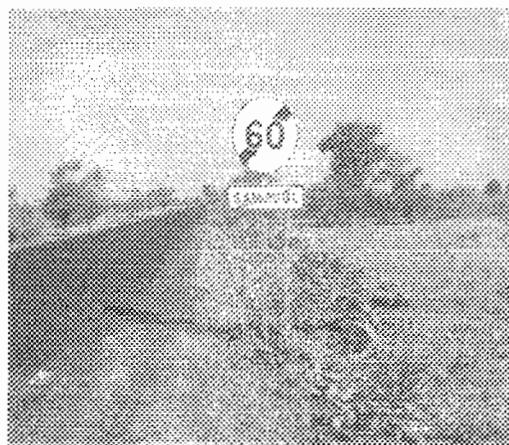
Surface de roulement un peu fissurée



Matériaux bitumineux sur l'axe de la route



Enrobé trouvé sur place



Dépôt de matériaux au niveau du village de Gamboul

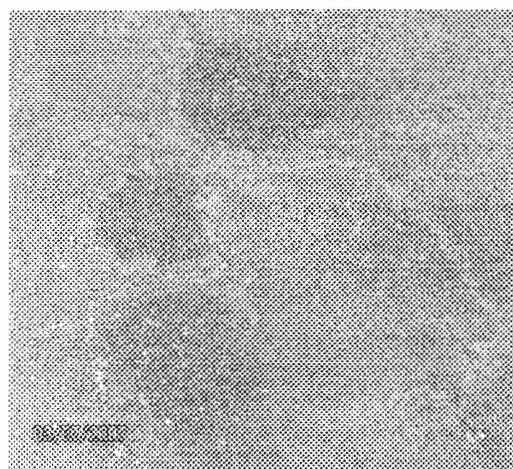


Matériaux bitumineux au bord de la route

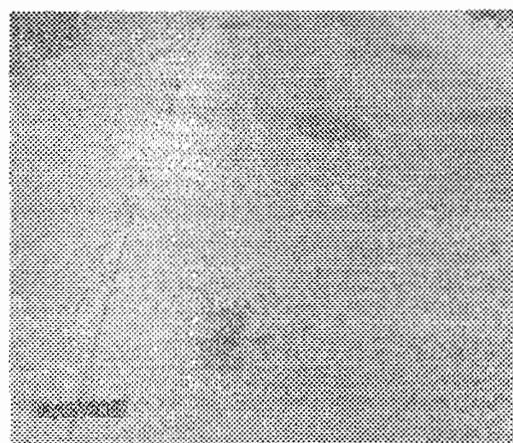


Reparation localisée

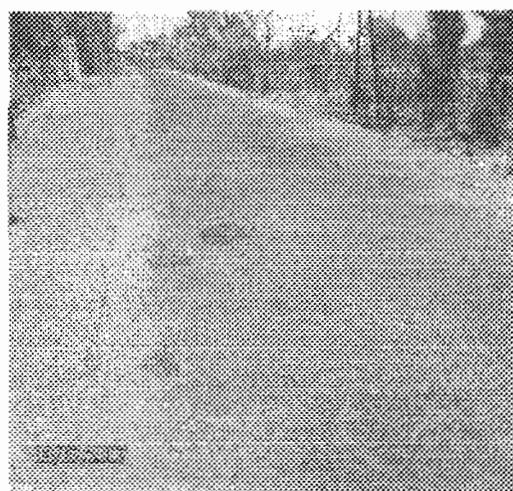
Photos prises sur une route dégradée mal entretenue



Mauvais uni

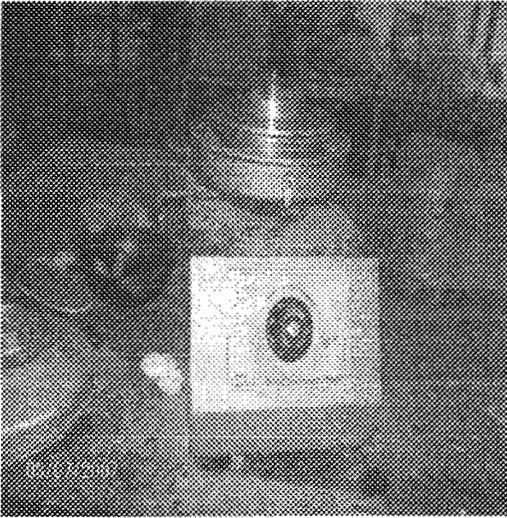


Point à temps

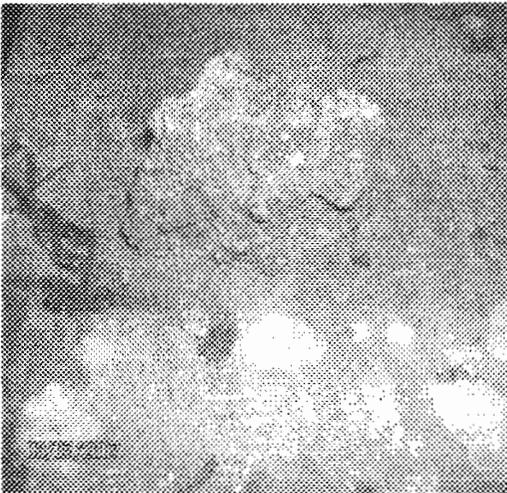


Point à temps

Photos prises lors de l'essai d'extraction



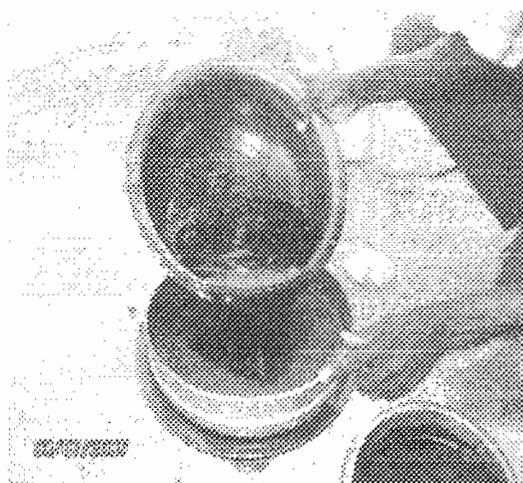
Extracteur



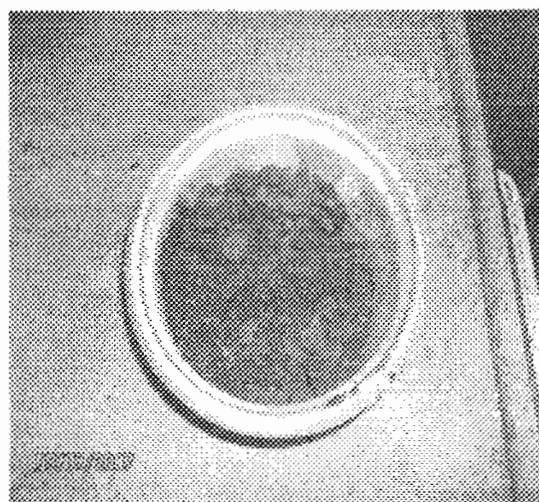
Echantillon



Table d'essai



Enlèvement du liant



Echantillon étuvé



Mesure de la granularité