



Ministère
de l'Équipement,
des Transports
et du Tourisme



CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSÉE

Guide technique



GLOSSAIRE DE L'ENSEMBLE DES NOTATIONS

LES NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS

SONT REGROUPÉES PAR THÈME :

- Matérioux,
- Paramètres de dimensionnement,
- Support de chaussée,
- Essais et grandeurs mesurées,
- Trafic,
- Tenue ou gel/dégel.

MATERIAUX

BAC	béton ormé continu
BB	béton bitumineux
BBC	béton bitumineux clouté
BBDr	béton bitumineux drainant
BBL	béton bitumineux de liaison
BBM	béton bitumineux mince
BBME	béton bitumineux à module élevé
BBS	béton bitumineux pour chaussée souple à faible trafic
BBSG	béton bitumineux semi-greux
BBTM	béton bitumineux très mince
BBUM	béton bitumineux ultra-mince
BC	béton de ciment
BCg	béton de ciment goudonné
BCR	béton compacté routier
Bm	béton maigre
CV	cendres volantes
ECF	enrobé coulé à froid
EME	enrobé à module élevé
ES	enduit superficiel
GB	grave-bitume
GC	grave-ciment
GCV	grave-cendres volantes
GE	grave-émulsion
GH	grave traitée aux liants hydrauliques

GL	grave-laïtier
GNT	grave non traitée (de type "A" ou "B")
GPz	grave-pauzalones-chaux
GRH	grave reconstituée humidifiée (GNT de type "B")
LTCC	liman traité à la chaux et au ciment
MTLH	matériaux traités aux liants hydrauliques
SC(α)	sable traité au ciment, de classe mécanique α
SL(α)	soble traité au laitier, de classe mécanique α

PARAMETRES DE DIMENSIONNEMENT

b	pende de fatigue du matériau exprimée sous forme d'une loi bi-logarithmique
c	coefficient associant la variation de déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée Δh (m^{-1})
E	module d'Young (MPa)
E(θ, f)	module d'Young à la température θ et à la fréquence f (MPa)
f	fréquence (Hz)
f_t	résistance en flexion sur éprouvette trapézoïdale (MPa)
f_t	résistance en traction par fendage, "essai brésilien" (MPa)
k_c	coefficient de cologe
k_d	coefficient tenant compte des discontinuités des structures de chaussées rigides et de l'incidence des gradients thermiques pour les chaussées en béton
k_r	coefficient ajustant la valeur de déformation ou de contrainte admissible en fonction du risque de calcul et des facteurs de dispersion
k_s	coefficient de prise en compte d'hétérogénéités locales de portance de la couche non liée sous-jacente
K	rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale (structure mixte)
p	période de calcul (années)
r	risque de calcul
Sh	écart-type sur l'épaisseur de la couche de matériaux mise en œuvre (m)
SN	écart-type sur le logarithme du nombre de cycles entraînant la rupture par fatigue
u	variable aléatoire de la loi normale centrée réduite associée au risque r
B	pende de fatigue du matériau exprimée sous forme d'une loi semi-logarithmique
δ	écart-type combinant la dispersion sur les épaisseurs et celle des résultats des essais de fatigue

$\epsilon_{t,ad}$	déformation horizontale admissible en traction
$\epsilon_{z,ad}$	déformation verticale admissible en compression
ϵ_t	déformation en traction/compression maximale dans le plan horizontal
ϵ_z	déformation verticale maximale
E_δ	déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de 10^6 cycles avec une probabilité de 50%, à 10 °C et 25 Hz
$\epsilon_\delta(\theta, f)$	déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de 10^6 cycles avec une probabilité de 50%, à θ °C et pour une fréquence f
$\epsilon(N, \theta, f)$	déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de N cycles avec une probabilité de 50 %, pour la température θ et la fréquence f
ν	coefficient de Poisson
$\nu(\theta, f)$	coefficient de Poisson à la température θ et à la fréquence f
θ	température de calcul (°C)
θ_{eq}	température équivalente (°C)
$\sigma_{t,ad}$	contrainte admissible en traction à la base d'une couche (MPa)
σ_t	contrainte en traction/compression maximale dans le plan horizontal (MPa)
σ_δ	contrainte pour laquelle la rupture par traction en flexion sur éprouvette de 360 jours est obtenue pour 10^6 cycles (MPa)
$\sigma_t(N)$	contrainte pour laquelle la rupture par traction en flexion sur éprouvette de 360 jours est obtenue pour N chargements (MPa)

SUPPORT DE CHAUSSÉE

A, B, C, D, R, F	classes des sols et matériaux rocheux (cf. guide technique Réalisation des remblais et des couches de ferme [19])
ARi	classe de portance à long terme de l'arase de terrassement
PFi	classe i de portance à long terme de la plate-forme support de chaussée
PST	partie supérieure des terrassements

ESSAIS ET GRANDEURS MESURÉES

APL	analyseur de profil en long
CFL	coefficient de frottement longitudinal
CFT	coefficient de frottement transversal
PCGG	presse à cisaillement giratoire
A	coefficient d'aplatissement
CBR	indice de portance californien (Californian Bearing Ratio) (%)
C_{PA}	coefficient de polissage accéléré
d	diamètre des plus petits éléments d'un matériau
D	diamètre des plus gros éléments d'un matériau
ES	équivalent de sable
Ec	module sécant à 30% de la résistance en compression simple (MPa)
Et	module sécant à 30% de la résistance en traction directe (MPa)
EV ₂	module à la plaque au second cycle de chargement
HS _v	hauteur au sable vraie
I _c	indice de cassange
I _p	indice de plasticité (%)
IPI	indice de portance immédiate ou indice portant immédiat (%)
L _A	coefficient Los Angeles (%)
M _{DE}	coefficient micro-Deval, en présence d'eau (%)
OPN	optimum proctor normal
OPM	optimum proctor modifié
r	résistance à la compression simple après immersion (MPa) à l'essai Duriez
R	résistance à la compression simple avant immersion (MPa) à l'essai Duriez
R _c	résistance en compression simple (MPa)
R _f	résistance à la flexion (MPa)
R _t	résistance à la traction directe (MPa)
VB ₁₀	valeur de bleu de méthylène, à la tache (g de bleu pour 100 g de fines)
VBS	valeur de bleu de méthylène du sol (g de bleu pour 100 g de sol)
w	teneur en eau (%)
w _l	limite de liquidité (%)
w _p	limite de plasticité (%)
ρ _s	masse volumique des grains (g/cm ³)
ρ	masse volumique (kg/m ³)

TRAFIC

CAM	coefficient d'agressivité moyenne du poids lourd par rapport à l'essieu de référence
-----	--

N	nombre cumulé de véhicules sur la période de calcul retenue
NE	nombre équivalent d'essieux de référence correspondant au trafic poids lourds cumulé sur la durée de calcul retenue
MJA	moyenne journalière annuelle
PL	poids lourd (véhicule de charge utile supérieure ou égale à 50 kN)
τ	taux annuel de croissance géométrique du trafic (%)
I	trafic journalier moyen, par sens de circulation, à la mise en service
T _i	classe de trafic à la mise en service

TENUE AU GEL/DÉGEL

h _n	épaisseur des matériaux non gélifs de la plate-forme (m)
h _p	épaisseur des matériaux peu gélifs de la plate-forme (m)
HE	hiver exceptionnel
HR	hiver rigoureux non exceptionnel
IAtm	indice de gel atmosphérique (°C.jour)
IA	indice de gel admissible de la chaussée (°C.jour)
IR	indice de gel de l'hiver de référence (°C.jour)
IS	indice de gel de surface (°C.jour)
It	indice de gel transmis à la base de la structure (°C.jour)
p	penie obtenue à l'essai de gonflement [(mm/(°C.heure)) ^{1/2}]
Q _{PF}	quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme [(°C.jour) ^{1/2}]
Q _g	quantité de gel transmise aux couches de sol gélives [(°C.jour) ^{1/2}]
Q _{ng}	protection thermique apportée par les matériaux non gélifs de la couche de forme et du sol support [(°C.jour) ^{1/2}]
Q _M	quantité de gel transmise aux couches de sol gélives, correspondant à un surcroît de dommage limité de la structure de chaussée [(°C.jour) ^{1/2}]
SGα	classe de sensibilité au gel : SGn : matériau non gélif SGp : matériau peu gélif SGT : matériau très gélif
λ _g	conductivité thermique du sol gelé (W/m.°C)
λ _{ng}	conductivité thermique du sol non gelé (W/m.°C)



CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSÉE

Guide technique

Décembre 1994

Document édité par :

LCPC



Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

58, boulevard Lefebvre - F75732 Paris CEDEX 15

Téléphone 33 (1) 40 43 50 00 - Télécopie 33 (1) 40 43 54 98 - Télex LCPARI 200361 F
et

Le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes

Centre de la Sécurité et des Techniques Routières

46, avenue Aristide-Briand - BP 100 - F92223 Bagneux CEDEX

Téléphone 33 (1) 46 11 31 31 - Télécopie 33 (1) 46 11 31 69 - Télex 632263



Ce guide technique a été rédigé sous la direction de Jean-François CORTÉ, Directeur technique au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, assisté de Marie-Thérèse GOUX (SETRA) qui a assuré le secrétariat technique du groupe, avec la collaboration d'un groupe de travail composé de :

- Jean-Pierre ANTOINE (Gerland Routes)
- Christian BABILOTTE (LRPC de Lyon),
- Antoine DE BOISSOUUDY †(LCPC)
- Gilbert CAROFF (Scétauroute)
- Jean-Luc DELORME (LRPC de l'Est parisien)
- Didier DESMOULIN (SCREG Routes)
- Jean-François GARNIER (Total)
- Honoré GOACOLOU (Entreprise Jean Lefèbvre)
- Rolf KOBISCH (LRPC de Saint-Brieuc)
- Jean-Pierre MARCHAND (Cochery Bourdin Chaussé)
- Yves MEUNIER (Beugnet)
- Jean-Paul MICHAUT (Colas)
- Hugues ODÉON (LCPC)
- Daniel RENAULT (DTC/CETE Méditerranée)
- Emmanuel RÉNIÉ (Viafrance)
- Maurice SIFFERT (LRPC de l'Ouest parisien)

Ce document est propriété de l'Administration et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation du LCPC ou du SETRA.

© 1994 – LCPC

PRÉFACE

LA DÉMARCHE retenue par la Direction des routes en matière de dimensionnement des chaussées sous la forme de catalogues de structures-types (avec une première édition en 1971, une refonte générale en 1977 et l'actualisation de 1988) avait par essence pour objectifs principaux :

- de fixer une stratégie technico-économique valable pour l'ensemble du réseau des routes nationales et garante d'une homogénéité de niveau de service ;
- de fournir à tous les services extérieurs et au réseau technique de l'État des solutions techniques bien définies et comparables ;
- d'éviter au projecteur de devoir procéder à des calculs laborieux à une époque où les moyens informatiques disponibles localement étaient encore limités.

Les choix effectués à l'époque, résultat d'une synthèse de connaissances empiriques et des apports rationnels de la mécanique des chaussées, avaient été parfois fondés sur des analogies pour pallier l'insuffisance de certaines données. Dans ces conditions, il avait été décidé de fournir un éventail de solutions sans l'exposé nécessairement complexe du détail des règles suivies pour le dimensionnement. Ainsi, les catalogues n'explicitaient-ils que les variables d'entrée.

Il convient encore de rappeler que la définition de ces catalogues était indissociable de l'ensemble des directives et recommandations publiées par la Direction des routes qui ont permis une production de matériaux de chaussée aux caractéristiques prédéfinies et uniques par technique.

Au cours des dernières années, le contexte technico-économique s'est profondément modifié, ce qui a motivé l'entreprise de rédaction d'un document explicitant une démarche de dimensionnement des structures de chaussée qu'accepterait l'ensemble des acteurs du secteur routier. Au compte de ces facteurs d'évaluation les plus importants, on relèvera ici :

- la normalisation des produits et matériaux de chaussée qui a conduit à substituer à la notion de matériaux-types des directives, celle de classes de matériaux caractérisées par leurs performances mécaniques. Cette diversification des classes de performance impliquait que soit expliquée la manière dont doivent être modulées en conséquence les épaisseurs des couches de chaussée ;
- la politique de décentralisation qui s'est accompagnée d'une différenciation des stratégies des divers maîtres d'ouvrage du domaine routier. Il apparaissait donc nécessaire qu'une démarche unique pût être dégagée pour les aspects purement techniques, afin de préserver l'unicité des concepts utilisés sur l'ensemble du territoire national et de fournir des outils communs permettant l'appréciation objective des solutions proposées par les maîtres d'œuvre et les entreprises en regard des besoins exprimés par les maîtres d'ouvrage ;
- l'accélération du rythme d'évaluation des techniques routières qui fait que la mise à profit des innovations ne peut s'accommoder d'un acte qui ne fixe que les seules solutions techniques acceptables ;

- enfin, le fait qu'il est actuellement possible de disposer partout des moyens de calcul nécessaires pour l'application de la méthode rationnelle de dimensionnement des structures de chaussée.

Alors que dans de nombreux pays encore le dimensionnement des structures de chaussée relève d'une approche empirique, a été dégagée progressivement en France, au cours des trente dernières années, une démarche originale qualifiée de « rationnelle » car tirant parti des résultats de la mécanique des structures. Cette démarche rationnelle avait déjà guidé la définition des fiches du catalogue publié en 1977, mais n'avait pas alors été rendue publique.

Le présent guide répare cette omission en intégrant les connaissances acquises depuis et permettra de faire valoir aussi à l'étranger les fondements de la démarche française.

Ce document est le fruit d'un travail de plusieurs années, animé par le réseau technique de l'Administration en collaboration très étroite avec les entreprises de construction routière et Scétauroute pour le secteur autoroutier.

Ce guide ne fixe bien sûr pas les options, ni les valeurs des paramètres de base dont le choix incombe au maître d'ouvrage (stratégie d'investissement, durée initiale, risque de calcul, risque d'interruption de service acceptable...). Ceci est à préciser par chaque maîtrise d'ouvrage dans un document d'application particulier, ce que fera la Direction des routes pour le réseau des routes nationales.

Le Directeur des routes
Christian LEYRIT



SOMMAIRE



INTRODUCTION



PARTIE I

FONDEMENTS DE LA MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT
DES CHAUSSÉES



PARTIE II

RELATION ENTRE LES CHOIX DE CONCEPTION
DES CHAUSSÉES ET DE GESTION D'UN RÉSEAU ROUTIER



PARTIE III

LA COUCHE DE SURFACE



PARTIE IV

LA PLATE-FORME SUPPORT DE CHAUSSÉE



PARTIE V

LES MATÉRIAUX DE CHAUSSÉE



PARTIE VI

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES NEUVES



ANNEXES

Page laissée blanche intentionnellement

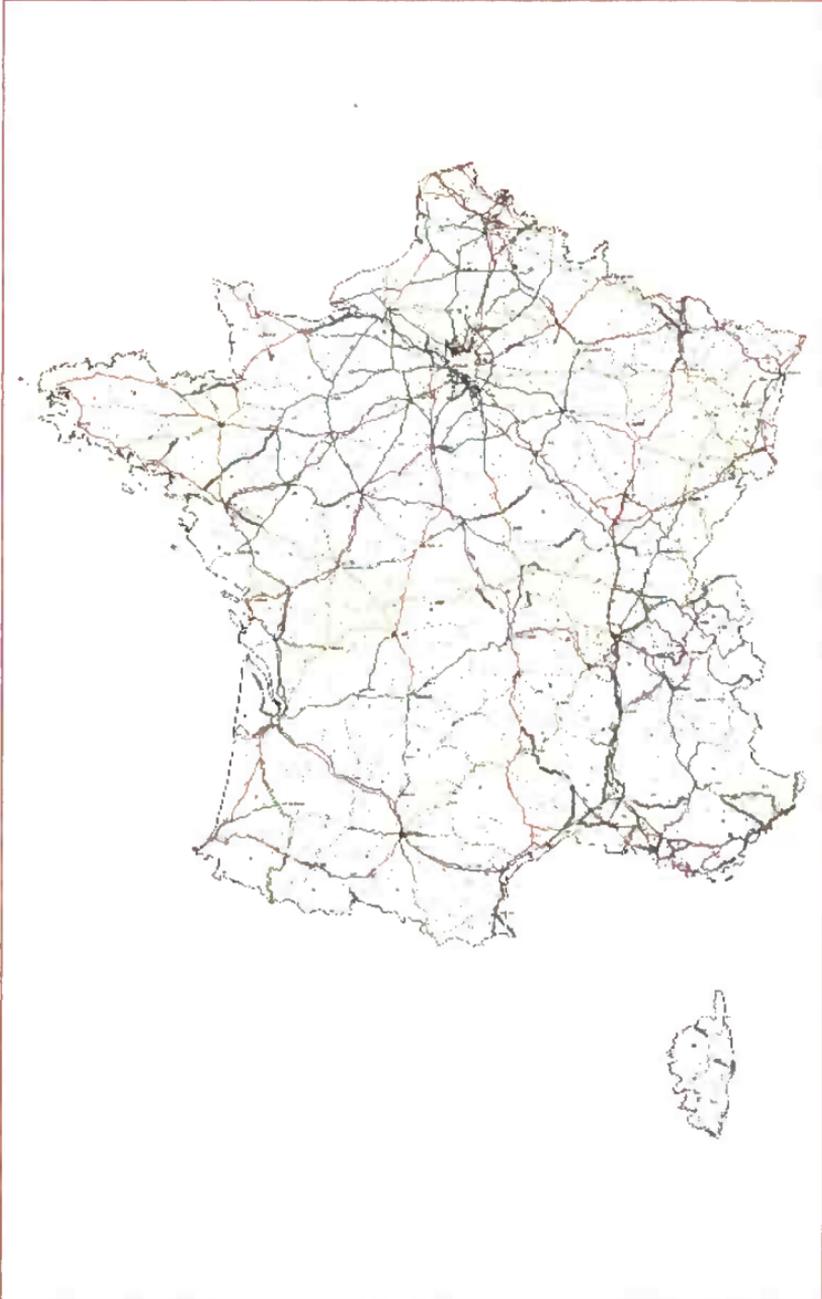


INTRODUCTION

1. DOMAINE D'APPLICATION DE LA MÉTHODE

2. ORGANISATION DU DOCUMENT

- 2.1. PARTIE I. FONDEMENTS DE LA MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES
- 2.2. PARTIE II. RELATION ENTRE LES CHOIX DE CONCEPTION DES CHAUSSÉES
ET DE GESTION D'UN RÉSEAU ROUTIER
- 2.3. PARTIE III. LA COUCHE DE SURFACE
- 2.4. PARTIE IV. LA PLATE-FORME SUPPORT DE CHAUSSÉE
- 2.5. PARTIE V. LES MATÉRIAUX DE CHAUSSÉE
- 2.6. PARTIE VI. DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES NEUVES
- 2.7. ANNEXES



- Autoroute concédée
- Voie rapide urbaine (VRU)
- Liaison d'aménagement en continuité du réseau autoroutier (LACRA)
- Grande liaison d'aménagement du territoire (GLAT)
- Route de liaison
- Autre route nationale
- Réseau non renforcé (fin 1991)

Le réseau routier national

LE RÉSEAU ROUTIER FRANÇAIS est géré par une multiplicité de maîtres d'ouvrage que sont, outre l'État, des collectivités territoriales, ainsi que des sociétés d'économie mixte ou privées pour certaines autoroutes concédées. En 1993, le réseau routier français comporte plus de 900 000 km de routes revêtues qui se répartissent selon la maîtrise d'ouvrage, en :

- 28 250 km de routes nationales, 1 670 km d'autoroutes urbaines et 810 km d'autoroutes de liaison, non concédées, gérées par l'État,
- 5 800 km d'autoroutes à péage, concédées à des sociétés d'économie mixte ou privées,
- 354 000 km de routes départementales, dont les maîtres d'ouvrage sont les départements,
- 526 000 km de voies communales dont les maîtres d'ouvrage sont les communes,

auxquels s'ajoutent environ 650 000 km de chemins forestiers ou agricoles, souvent non revêtus.

Le contexte français est aussi caractérisé par l'emploi d'une grande diversité de techniques de chaussée (assises traitées aux liants hydrauliques ou aux liants hydrocarbonés, groves non traitées, chaussées en béton de ciment) ainsi que par un effort continu d'innovation sur les matériaux et les méthodes de réalisation des chaussées de la part des entreprises. Cet éventail permet d'effectuer des choix entre techniques en fonction des objectifs de service retenus pour la route et des conditions économiques du moment.

Le présent document expose les fondements et la démarche de la méthode de dimensionnement des structures de chaussée développée en France. Il constitue un cadre de référence technique unitaire qui permet d'aborder, selon une démarche commune, la définition des différentes structures de chaussée en fonction de la stratégie d'investissement et de gestion retenue par chaque maître d'ouvrage.

L'objet de ce document est aussi de mieux faire connaître à l'étranger la méthode française de dimensionnement des chaussées, ce qui permettra, le cas échéant l'établissement de méthodes adaptées à d'autres contextes.

1. DOMAINE D'APPLICATION DE LA MÉTHODE

Les principes exposés dans ce document se rapportent à la conception des structures de chaussées routières (exception faite des chaussées non revêtues et des chaussées pavées). La méthode de dimensionnement s'applique, de par ses fondements, aux différentes catégories de routes, depuis les chaussées à faible trafic jusqu'aux structures autoroutières.

Si les dimensionnements ont été calés en fonction des conditions climatiques et des charges roulantes légalement admises sur le territoire français, la démarche rationnelle par laquelle sont traités ces différents facteurs permet de transposer les règles explicitées dans ce document à d'autres contextes.

Les aspects propres aux sollicitations des pistes aéroportuaires ou des plateformes industrielles ne sont pas traités ici. Cependant, l'approche mécanique du dimensionnement, qui est l'un des traits d'originalité de la méthode française, peut, dans certains cas, fournir des éléments à partir desquels pourront être établies des règles adaptées à ces conditions particulières.

Le document explicite les étapes de la démarche du dimensionnement conduisant à la détermination des épaisseurs des différentes couches de la structure de chaussée pour la stratégie d'investissement et d'entretien retenue, et en fonction des objectifs de service, du trafic, et des conditions d'environnement. Il précise de quelle manière les paramètres de calcul sont rattachés aux propriétés physiques et mécaniques des matériaux, pour les différentes techniques de chaussée.

Pour définir les structures de chaussée appropriées à un réseau donné, il faut cependant encore compléter les dispositions contenues dans ce document par la donnée d'un corps de règles dont le choix incombe au maître d'ouvrage. Il revient en effet à chaque maître d'ouvrage de fixer ses objectifs de service, lesquels seront traduits entre autres par des choix de durée de service avant de premiers travaux d'entretien, de risques acceptés d'interruption de service selon les aléas climatiques, etc. Sur ces divers points il ne peut y avoir de règle valable pour toutes les situations.

2. ORGANISATION GÉNÉRALE DU DOCUMENT

Le document est organisé en six parties et sept annexes.

2.1. PARTIE I. FONDEMENTS DE LA MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES

La partie I présente le cadre dans lequel s'inscrit le démarche de dimensionnement de la structure de chaussée.

Les différentes familles de structures de chaussée réalisées en France sont décrites ainsi que leur mode de fonctionnement mécanique et leurs modes d'endommagement les plus fréquents. Un bref historique montre l'évolution des principes du dimensionnement des structures de chaussée en France qui a conduit à la présente méthode.

Les grandes lignes et les concepts qui sous-tendent la méthode française de dimensionnement sont exposés. Il est fait état du caractère probabiliste de la démarche et la notion de *risque de calcul* est définie. Les facteurs pris en compte dans le dimensionnement de la structure de chaussée sont énumérés.

2.2. PARTIE II. RELATION ENTRE LES CHOIX DE CONCEPTION DES CHAUSSEES ET DE GESTION D'UN RÉSEAU ROUTIER

La partie II replaçait le démarche de dimensionnement dans un contexte plus large qui part des préoccupations de gestion des réseaux routiers.

Les facteurs contribuant au choix du niveau de service sont identifiés. Le choix de la stratégie d'investissement et d'entretien est mis en relation avec cet objectif. Les implications techniques sur le choix de structure de chaussée qui en découlent sont indiquées. La partie II mentionne enfin sur quelles bases une étude économique d'optimisation peut être envisagée.

2.3. PARTIE III. LA COUCHE DE SURFACE

La partie III expose d'abord le démarche du choix de la couche de surface en fonction des objectifs de qualité de service. Les différentes techniques sont passées en revue par rapport à ces objectifs. Cette partie décrit ensuite comment déterminer l'épaisseur de la couche de surface et la manière dont elle intervient dans le dimensionnement du corps de chaussée.

2.4. PARTIE IV. LA PLATE-FORME SUPPORT DE CHAUSSEE

La partie IV fait le lien avec le guide technique *Réalisation des remblais et des couches de forme* [19] sur lequel s'appuie le projet de terrassements. Il présente la

manière dont les sols supports de chaussée sont classés et caractérisés mécaniquement.

Les fonctions recherchées pour la couche de forme sont explicitées. Les qualités requises pour l'emploi des matériaux en couche de forme sont rappelées.

Le document indique comment le couple "sol support-couche de forme" est caractérisé pour le calcul de la structure de chaussée. Des règles de surclassement de portance de la plate-forme sont données selon la qualité et l'épaisseur du matériau de couche de forme. La démarche d'une étude d'optimisation du coût global de la chaussée et de la couche de forme est exposée.

2.5. PARTIE V. LES MATÉRIAUX DE CHAUSSÉE

La partie V présente l'ensemble des textes et dispositions techniques existant en France et par lesquels sont codifiés et décrits les différents matériaux et produits des couches de chaussée.

Pour les divers matériaux élaborés sont données :

- une description des caractéristiques physiques et mécaniques des diverses classes de matériaux de référence pour lesquels la méthode de dimensionnement a été colée,
- la manière dont les valeurs des paramètres de calcul sont déduites des résultats des essais mécaniques.

Ceci permet de situer, par référence à des situations connues, les limites d'application de la méthode et le mode de caractérisation de produits nouveaux.

2.6. PARTIE VI. DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES NEUVES

La partie VI indique en introduction comment s'insère l'étude de dimensionnement de la structure de chaussée dans l'étude générale du projet routier. Ce chapitre mentionne à cette occasion les aspects principaux qui caractérisent l'approche technique française.

Les données requises pour dimensionner la structure de chaussée sont ensuite examinées, à savoir :

- les paramètres de base attachés au choix de stratégie de gestion: durée initiale et risque de calcul, trafic,
- les données climatiques et d'environnement,
- les paramètres descriptifs des matériaux.

Les principes généraux et l'articulation de la démarche de dimensionnement, variables pour les différentes techniques de chaussée, sont exposés avant de détailler pour chacune d'elles :

- la modélisation retenue pour décrire la structure de la chaussée,
- les critères retenus pour le dimensionnement,

– les étapes de la démarche de dimensionnement, l'ensemble étant illustré par un exemple de calcul complet. Il est aussi fait état des dispositions constructives particulières, essentielles pour le maintien de l'intégrité de la structure, lorsque ces dispositions n'interviennent pas explicitement dans le calcul.

Le document décrit alors la méthode développée en France pour la vérification des chaussées au gel-dégel. Celle-ci est décauplée de l'analyse de la tenue sous trafic.

La partie VI se termine par un chapitre consacré à la détermination du profil en travers de la chaussée, une fois fixées les épaisseurs nominales des couches.

2.7. ANNEXES

En annexes sont présentés :

- la liste des notations employées (A.1.),
- la liste des normes d'essais et de produits (A.2.),
- un répertoire des textes précisant la doctrine technique française et auxquels le présent document fait référence (A.3.),
- les tableaux synoptiques de classification des sels et matériaux racheux pour les travaux de terrassement (A.4.),
- quelques exemples de calcul de certains paramètres ou de structures :
 - calcul de l'agressivité d'un trafic (A.5.),
 - calcul de température équivalente (A.6.),
 - calcul d'une chaussée sur couche de ferme traitée (A.7.).

Page laissée blanche intentionnellement



I. FONDEMENTS DE LA MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES

1. DESCRIPTION FONCTIONNELLE DES COUCHES DE CHAUSSEE
2. LE FONCTIONNEMENT DES DIFFERENTES FAMILLES DE CHAUSSEES ET LEURS MODES D'ENDOMMAGEMENT
 - 2.1. LES FAMILLES DE STRUCTURES DE CHAUSSEE
 - 2.2. FONCTIONNEMENT ET ENDOMMAGEMENT DES DIFFERENTES FAMILLES DE STRUCTURES
3. ÉVOLUTION HISTORIQUE DE LA MÉTHODE FRANÇAISE DE DIMENSIONNEMENT
4. GRANDES LIGNES DE LA PRÉSENTE MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT
 - 4.1. LE CARACTERE PROBABILISTE DU DIMENSIONNEMENT
 - 4.2. LES CONCEPTS DE DURÉE INITIALE ET DE RISQUE DE CALCUL
 - 4.3. LES FACTEURS PRIS EN COMPTE POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES
 - 4.4. DÉTERMINATION DES SOLlicitATIONS ADMISSIBLES
 - 4.5. DÉFINITION DES ÉPAISSEURS DE COUCHES

Page laissée blanche intentionnellement

1. DESCRIPTION FONCTIONNELLE DES COUCHES DE CHAUSSÉE

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches (fig. 1.1.1.) mises en œuvre sur un ensemble appelé **plate-forme support de chaussée** constituée du sol terrassé (dit **sol support**) surmonté généralement d'une **couche de forme**.

La couche de forme

Cette couche de transition entre le sol support et le corps de chaussée a une double fonction :

- pendant la phase de travaux, elle protège le sol support, elle établit une qualité de nivellement et permet la circulation des engins pour l'approvisionnement des matériaux et la construction des couches de chaussée,
- vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la chaussée, elle permet de rendre plus homogènes et éventuellement d'améliorer les caractéristiques dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place ainsi que de les protéger du gel.

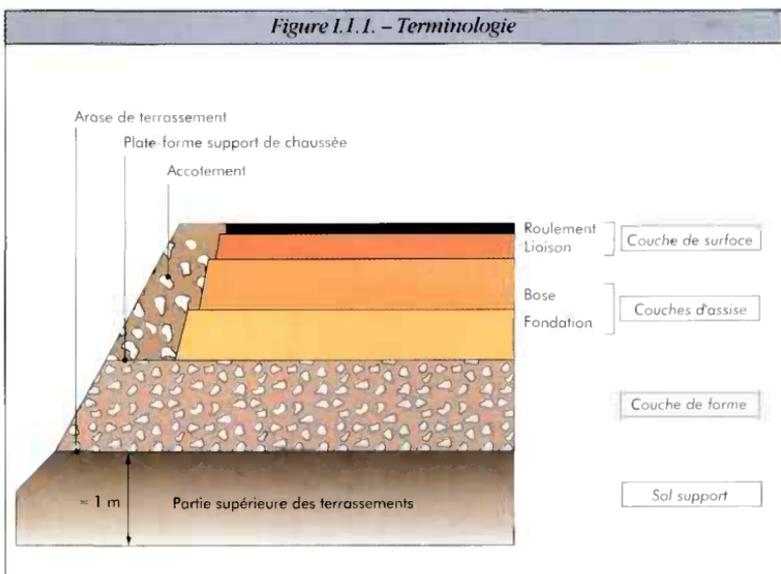
Le rôle des couches formant le corps de chaussée :

- les **couches d'assise** : fondation et base,
- la **couche de surface**,

peut être distingué par leur apport aux fonctions que doit assurer la chaussée.

Les couches d'assise

L'assise de chaussée est généralement constituée de deux couches, la **couche de fondation** surmontée de la **couche de base**. Ces couches en matériaux élaborés (le plus souvent liés pour les chaussées à trafic élevé) appartiennent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans des limites admissibles.



Pour les chaussées à faible trafic, le rôle de couche de fondation peut être, dans certains cas, assuré par un traitement du sol en place.

La couche de surface

La couche de surface est constituée :

- de la **couche de roulement**, qui est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat,
- et le cas échéant d'une **couche de liaison**, entre les couches d'assise et la couche de roulement.

C'est à l'interface entre la couche de surface et la couche de base que l'on trouvera éventuellement les dispositifs visant à ralentir la remontée des fissures des couches d'assises traitées aux liants hydrauliques.

Des caractéristiques de surface de la couche de roulement dépend pour une large part la qualité d'usage de la chaussée. La couche de surface contribue en outre à la pérennité de la structure de chaussée en particulier par la fonction d'étanchéité vis-à-vis de l'assise.

Les fonctions et les objectifs à considérer pour le choix de la couche de surface sont développés dans la partie III.

2. LE FONCTIONNEMENT DES DIFFÉRENTES FAMILLES DE CHAUSSÉES ET LEURS MODES D'ENDOMMAGEMENT

Les chaussées évoluent et se dégradent sous l'effet généralement combiné de la répétition des charges roulantes (trafic), des agents climatiques et du temps. La connaissance de la nature des dégradations et de leurs modes d'évolution est essentielle pour :

- comprendre le mode de fonctionnement des structures de chaussées,
- choisir le modèle de calcul adapté à la technique,
- ajuster enfin les résultats des calculs pour les aspects mal appréhendés par le modèle mécanique utilisé pour le dimensionnement de la structure de chaussée.

Les dégradations les plus couramment rencontrées, selon la nature et la qualité des différentes couches, sont décrites ci-après.

Couche de roulement

- Usure due aux efforts tangentiels exercés par les charges roulantes,
- orniérage par fluage dans des conditions excessives de température et de sollicitations par le trafic,
- fissuration de fatigue par suite d'une mauvaise adhérence de la couche de roulement bitumineuse à l'assise,
- fissuration par remontée des fissures des couches d'assise de chaussée,
- fissuration par fatigue thermique suite à un vieillissement du bitume.

Couches d'assise traitées

- Fissuration de fatigue due à la répétition des efforts de traction par flexion au passage des charges,
- fissuration de prise et de retrait thermique des graves traitées aux liants hydrauliques,
- fissuration due aux gradients thermiques des dalles de béton,
- pompage et décalage de dalles dans les couches présentant des fissures de retrait ou des joints, du fait d'une mauvaise qualité du transfert de charge et de l'érodabilité du support.

Couches d'assise non liées et support de chaussée

- Déformations permanentes de la structure (affaissement, orniérage...) dues au cumul de déformations plastiques.

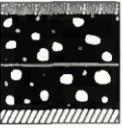
Pour chaque type de structure de chaussée, il existe des défauts prépondérants traduisant des modes de fonctionnement particuliers.

Les différents types de structures de chaussée



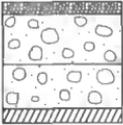
CHAUSSEES SOUPLES

1. Couche de surface en matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (< 15 cm)
3. Matériaux granulaires non traités (20 à 50 cm)
4. Plate-forme support



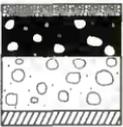
CHAUSSEES BITUMINEUSES EPAISSES

1. Couche de surface en matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (15 à 40 cm)
3. Plate-forme support



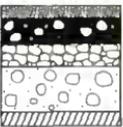
CHAUSSEES A ASSISE TRAITEE AUX LIANTS HYDRAULIQUES

1. Couche de surface en matériaux bitumineux (6 à 14 cm)
2. Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 50 cm)
3. Plate-forme support



CHAUSSEES A STRUCTURE MIXTE

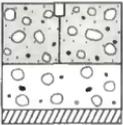
1. Couche de surface en matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm)
3. Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm)
4. Plate-forme support



CHAUSSEES A STRUCTURE INVERSE

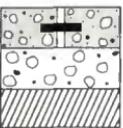
1. Couche de surface en matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm)
3. Matériaux granulaires non traités (≈ 12 cm)
4. Matériaux traités aux liants hydrauliques (15 à 50 cm)
5. Plate-forme support

CHAUSSEES EN BETON DE CIMENT



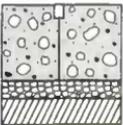
Dalles non goudonnées avec fondation

1. Béton de ciment (20 à 28 cm)
2. Béton maigre (12 à 18 cm) ou matériaux traités aux liants hydrauliques (15 à 20 cm)
3. Plate-forme support



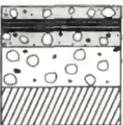
Dalles goudonnées avec fondation

1. Béton de ciment (17 à 23 cm)
2. Béton maigre (14 à 22 cm)
3. Plate-forme support



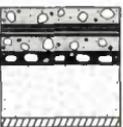
Dalles sans fondation

1. Béton de ciment (28 à 39 cm)
2. Couche drainante (matériaux granulaires ou géotextile)
3. Plate-forme support



Béton armé continu (1)

1. Béton de ciment (16 à 24 cm)
2. Béton maigre (12 à 14 cm)
3. Plate-forme support



Béton armé continu (2)

1. Béton de ciment (18 à 24 cm)
2. Matériaux bitumineux d'assise (5 cm)
3. Sable traité aux liants hydrauliques (50 à 60 cm)
4. Plate-forme support

2.1 LES FAMILLES DE STRUCTURES DE CHAUSSEE

L'une des caractéristiques du réseau routier français est l'existence d'une grande diversité de structures de chaussée, que l'on classe dans les familles suivantes :

- souples,
- bitumineuses épaisses,
- à assise traitée aux liants hydrauliques,
- à structure mixte,
- à structure inverse,
- en béton de ciment.

Dans le contexte français, ces différents groupes se caractérisent brièvement ainsi.

2.1.1. Les chaussées souples

Ces structures comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15 cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm.

2.1.2. Les chaussées bitumineuses épaisses

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, fait d'une ou deux couches (base et fondation). L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40 cm.

2.1.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Ces structures sont qualifiées couramment de "semi-rigide". Elles comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm.

2.1.4. Les chaussées à structure mixte

Ces structures comportent une couche de roulement et une couche de base en matériaux bitumineux (épaisseur de la base : 10 à 20 cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée soit de l'ordre de 1/2.

2.1.5. Les chaussées à structure inverse

Ces structures sont formées de couches bitumineuses, d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur totale, sur une couche en grave non traitée (d'environ 12 cm) reposant elle-

même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale atteint 60 à 80 cm.

2.1.6. Les chaussées en béton de ciment

Ces structures comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur éventuellement recouverte d'une couche de roulement mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (qui peut être en matériaux traités aux liants hydrauliques, en béton de ciment, ou drainante non traitée), soit directement sur le support de chaussée avec, dans ce cas, interposition fréquente d'une couche bitumineuse. La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal ("béton armé continu"), ou discontinue avec ou sans éléments de liaison aux joints.

2.2. FONCTIONNEMENT ET ENDOMMAGEMENT DES DIFFÉRENTES FAMILLES DE STRUCTURES

Ce chapitre décrit les traits les plus caractéristiques de fonctionnement et d'endommagement des différentes familles de structures. Cette brève description n'est pas exhaustive. Elle ne couvre pas les cas pour lesquels il y a eu erreur ou inadaptation dans le choix des constituants, dans la fabrication ou dans la mise en œuvre.

2.2.1. Les chaussées souples

- Sollicitations dues au trafic

Les matériaux granulaires non liés, qui constituent l'assise de ces chaussées, ont une faible rigidité qui dépend de celle du sol et de leur épaisseur. Comme la couverture bitumineuse est relativement mince, les efforts verticaux dus au trafic sont transmis au support avec une faible diffusion latérale. Les contraintes verticales élevées engendrent par leur répétition des déformations plastiques du sol ou de la grave qui se répercutent en déformations permanentes en surface de la chaussée. La couverture bitumineuse subit à sa base des efforts répétés de traction-flexion.

- Influence des conditions d'environnement

La faible rigidité de la structure rend ces chaussées particulièrement sensibles aux variations d'état hydrique des sols supports. Ceci se manifeste notamment par les "effets de bord" : réduction de portance en période humide pouvant conduire à des affaissements de rive et fissuration de retrait hydrique en période de dessiccation.

Remarque : La réduction de portance associée aux variations d'état hydrique des sols supports sensibles à l'eau est d'autant plus marquée (en saison pluvieuse et au dégel) que les conditions de drainage et l'imperméabilité de la couche de surface sont mauvaises. Elle existe pour les autres structures ; il n'en sera donc pas fait mention à chaque fois.

- Évolution du mode d'endommagement

L'évolution la plus fréquente des chaussées souples se manifeste d'abord par l'appari-

tion de déformations permanentes du type orniérogé à grand rayon, flaches et affaissements qui détériorent les qualités du profil en travers et du profil en long.

Ces déformations croissent avec le trafic cumulé, en gravité (amplitude verticale) et en étendue, selon la qualité moyenne de la structure et la dispersion des caractéristiques mécaniques du corps de chaussée et du sol.

Les sollicitations répétées de flexion alternée dans la couverture bitumineuse entraînent une dégradation par fatigue, sous la forme de fissures d'abord isolées puis évoluent peu à peu vers un foïençage à maille de faibles dimensions.

L'eau s'infiltrant alors plus facilement provoque une accélération des phénomènes : épaufrures aux lèvres des fissures avec départ de matériel, puis formation de nids de poule. Si la chaussée était alors laissée sans entretien, elle évoluerait très rapidement vers une destruction complète.

2.2.2. Les chaussées bitumineuses épaisses

• Sollicitations dues au trafic

La rigidité et la résistance en traction des couches d'assise en matériel bitumineux permettent de diffuser en les atténuant fortement les contraintes verticales transmises au support. En contrepartie, les efforts induits par les charges roulantes sont repris en traction-flexion dans les couches liées.

Ces chaussées comportent en général plusieurs couches. Lorsque celles-ci sont collées, les allongements maximaux se produisent à la base de la couche la plus profonde. Mais, si les couches sont décollées, chacune d'elles se trouvera sollicitée en traction et pourra se rompre par fatigue. La qualité des interfaces a donc une grande incidence sur le comportement de ces chaussées.

Quant aux efforts sur le support, ils sont généralement suffisamment faibles pour ne pas entraîner en surface des déformations permanentes avant l'endommagement par fatigue des couches bitumineuses liées.

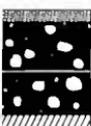
• Influence des conditions d'environnement

Elle est semblable à celle décrite pour les chaussées souples. L'orniérogé par fluage, favorisé par des températures élevées et un trafic lourd lent, n'affecte en général que la couche de surface. Il tient à des choix inadaptés de nature de matériaux et de formulation.

• Évolution du mode d'endommagement

Sans entretien, le processus de dégradation des chaussées bitumineuses épaisses se développe ainsi jusqu'à la ruine.

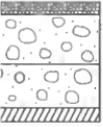
Du fait du dimensionnement en fatigue retenu en France, l'apparition de fissures longitudinales de fatigue dans les traces de roues est généralement postérieure aux dégradations de surface. Les fissures longitudinales se transforment progressivement en foïençage dont la dimension des mailles se réduit peu à peu. Cette transformation s'amorce dans les zones



de plus faible qualité (portance du support, caractéristiques du matériau lié, zone de décollement de la couche de roulement).

La dégradation des fissures accélère le processus avec l'infiltration de l'eau à travers le corps de chaussée. Ceci favorise en retour l'attrition des lèvres de fissures, le départ de matériaux et la formation de nids de poule. A ce stade de désorganisation des couches liées, le mode de fonctionnement de la chaussée est profondément modifié, les blocs réagissant isolément sous les charges.

Avec le dimensionnement et les matériaux retenus en France pour ces chaussées, on n'observe pas ou peu de déformations permanentes dues à une sollicitation excessive du sol, sauf cas exceptionnels (circulation intense après un hiver très rigoureux, défaut d'exécution par exemple).



2.2.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

- *Sollicitations dues au trafic*

Compte tenu de la grande rigidité des matériaux traités aux liants hydrauliques, les contraintes verticales transmises au support de chaussée sont faibles. En revanche, l'assise traitée subit des contraintes de traction-flexion qui s'avèrent déterminantes pour le dimensionnement de ce type de chaussée.

Ces structures comportent souvent une couche de base et une couche de fondation. Lorsque l'adhérence entre ces couches assure la continuité des déplacements, la contrainte maximale de traction est observée à la base de la couche de fondation. Dans le cas contraire (où il se produit un glissement relatif), les couches travaillent toutes deux en traction à leur base.

L'interface couche de surface bitumineuse-couche de base est aussi une zone sensible car :

- elle est soumise à des contraintes normales et de cisaillement horizontal,
- les quelques centimètres supérieurs de l'assise traitée sont souvent de plus faible résistance.

- *Influence des conditions d'environnement*

Les assises traitées aux liants hydrauliques sont sujettes aux retraits thermique et de prise. Le retrait, empêché par le frottement de la couche d'assise sur son support, provoque une fissuration transversale. Sans disposition constructive particulière, ces fissures remontent à travers la couche de roulement. Elles apparaissent en surface de la chaussée avec un espacement assez régulier (entre 5 et 15 m). Leur ouverture varie avec la température entre quelques dixièmes de mm et quelques mm. Souvent franches lors de leur apparition en surface, les fissures de retrait tendent à se dédoubler et se ramifier sous l'effet du trafic.

Du point de vue mécanique, ces discontinuités créent, à leur proximité au passage des véhicules, une augmentation de la contrainte transversale par rapport à la valeur observée pour un milieu continu. Cet accroissement de contrainte est fonction inverse de la qualité du transfert de charge entre les deux bords de la fissure. En outre, si le transfert est faible, la pression sur le support augmente fortement sous la charge.

La fissuration de retrait favorise la pénétration de l'eau, ce qui a des conséquences :

- aux interfaces, avec une diminution de la qualité du colage et de la partie supérieure de l'assise, une augmentation de l'allongement à la base de la couverture bitumineuse, un accroissement des contraintes de traction à la base des couches traitées ainsi que la modification des conditions d'appui sur le support de chaussée,
- sur le transfert de charge entre les lèvres de la fissure avec une attrition favorisée, une augmentation de la contrainte transversale de traction à la base des couches traitées, et de la contrainte verticale sur le support de chaussée.

• *Évolution du mode d'endommagement*

La couverture bitumineuse des premières assises traitées réalisées dans les années 60 était de faible épaisseur (5 cm) et souvent perméable. La surface de l'assise, mal protégée, et à la réalisation de laquelle on n'apportait pas un soin suffisant (faible compacité et feuilletage, dessiccation par inefficacité de l'enduit de cure), se dégradait rapidement par attrition avec la pénétration de l'eau (par les fissures de retrait thermique ou dans les zones d'enrobés perméables). Ceci entraînait l'apparition de remontées de boues en surface en période humide. Ces dégradations évoluaient rapidement en flaches avec des faïençages puis en nids de poule.

Pour les chaussées construites après 1975, la plus grande attention portée à la qualité de la surface de l'assise, une meilleure protection par augmentation de l'épaisseur de la couverture bitumineuse, et un scellement des fissures de retrait ont rendu ces phénomènes de remontées de boues très peu fréquents.

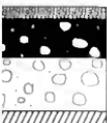
Par ailleurs, un certain nombre de procédés ont été mis au point pour contrôler la fissuration de retrait (pré-fissuration des couches d'assise) et limiter ou ralentir la remontée des fissures à travers la couche de roulement (complexes "anti-fissures").

Des réalisations anciennes, sous trafic modéré et dont l'interface roulement-base était de qualité, ont montré que l'accroissement de la fissuration longitudinale de fatigue dans les bandes de roulement conduisait, à terme, à la formation de petites dalles rectangulaires entre les fissures de retrait, avec localement des décolages par modification des conditions d'appui. A ce stade, le mode de fonctionnement de la chaussée est modifié avec une assise formée d'éléments discontinus. En pratique, on ne laisse pas les chaussées évoluer jusqu'à ce stade, les opérations d'entretien structurel étant généralement déclenchées à l'apparition des premières fissures de fatigue.

2.2.4. Les chaussées à structure mixte

Les différentes couches des structures mixtes ont un rôle fonctionnel distinct. La couche de matériau traité aux liants hydrauliques placée en fondation diffuse et atténuée, du fait de sa roideur élevée, les efforts transmis au sol support. Cette couche constitue par ailleurs un support de faible déformabilité pour les couches bitumineuses supérieures.

Les couches bitumineuses (dont l'une est généralement constituée de grave-bitume) ont plusieurs rôles. Elles assurent les qualités d'uni et de continuité que ce type de matériau permet ; grâce à leur épaisseur, elles servent à ralentir la remontée des fissures transver-



sales de la couche de matériaux traités aux liants hydrauliques et réduisent les contraintes de flexion à la base de la couche de fondation.

- *Sollicitations dues au trafic*

En première phase, les différentes couches restent adhérentes. La couche bitumineuse est alors peu sollicitée en traction (à l'exception toutefois des zones proches des fissures transversales présentes dans la couche traitée aux liants hydrauliques). C'est en revanche la base de la couche traitée aux liants hydrauliques qui est sollicitée en fatigue par flexion.

Par suite des mouvements de dilatation différentielle entre la grave-bitume et la grave traitée aux liants hydrauliques, et de l'action du trafic, l'adhérence de ces couches peut finir par se rompre dans certaines zones. Ceci entraîne une forte augmentation des contraintes de traction dans la couche de grave-bitume qui peut alors périr par fatigue à son tour.

- *Influence des conditions d'environnement*

La couche traitée aux liants hydrauliques est sujette au retrait, la couche bitumineuse assurant cependant une atténuation des gradients thermiques journaliers. Les écarts de température journaliers participent avec l'effet du trafic à la propagation de la fissuration à travers la couche bitumineuse (l'épaisseur de cette couche réduisant les facteurs d'intensité de contraintes).

- *Évolution du mode d'endommagement*

Pour les structures construites selon les règles du *Catalogue des structures types de chaussées neuves de 1977* [2], on constate dans l'ensemble un comportement satisfaisant. La fissuration, rare sinon exceptionnelle dans les régions de climat océanique, a été observée dans des climats plus continentaux avec des matériaux employant des granulats à fort coefficient de dilatation. Les fissures transversales des couches bitumineuses, peu denses et fines, nécessitent cependant un entretien pour éviter l'accélération par les entrées d'eau des phénomènes de détérioration.

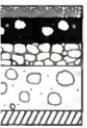
Sur des sols de mauvaise portance et lorsque l'épaisseur et la qualité des graves traitées aux liants hydrauliques était insuffisante, on a pu constater des flaches de grandes dimensions conduisant à un faïençage des couches bitumineuses.

2.2.5. Les chaussées à structure inverse

Les chaussées à structure inverse sont des structures composées de trois couches ayant chacune un rôle fonctionnel spécifique.

La couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques a pour objet d'atténuer les contraintes sur le sol et d'assurer par ailleurs aux couches supérieures un support de faible déformabilité. C'est, dans certains cas et sous certaines conditions, la couche de forme traitée qui tient lieu de couche de fondation.

La couche granulaire, relativement déformable dans le sens horizontal, a pour fonction



d'éviter la remontée des fissures consécutives aux phénomènes de retrait et aux mouvements d'origine thermique de la couche en matériaux traités aux liants hydrauliques.

La couverture bitumineuse assure les qualités d'uni et d'étanchéité.

- *Sollicitations dues au trafic*

La couche traitée aux liants hydrauliques assure une grande partie de la rigidité en flexion de la structure.

La couche bitumineuse travaille également en traction à la base de la couche, l'amplitude des allongements étant fonction de l'épaisseur et de la rigidité du support granulaire.

La couche granulaire, de faible épaisseur, est confinée par les couches liées. Reposant sur un support rigide, elle subit des contraintes relativement élevées. La grave concassée est choisie pour résister à l'attrition et avoir un module intrinsèque élevé afin de limiter la déformation de la couche bitumineuse. L'épaisseur de la couche granulaire est en général voisine de 12 cm pour obtenir une compacité élevée.

- *Influence des conditions d'environnement*

Les effets thermiques sur le développement de la fissuration de retrait des couches traitées aux liants hydrauliques et sur la déformabilité des couches bitumineuses, déjà signalés pour les autres structures de chaussée, se manifestent aussi sur les structures inverses.

- *Évolution du mode d'endommagement*

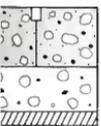
Les premières réalisations datent de 1975. Les essais effectués sur le manège de fatigue du LCPC ont mis en évidence les modes de dégradation potentiels : un léger orniérage attribuable à la couche granulaire et une fissuration transversale de fatigue des couches bitumineuses survenant après un grand nombre de cycles. Cette fissuration n'était pas très dense et les fissures sont restées fines. Il a par ailleurs été constaté que le pas des fissures n'était pas systématiquement relié à l'état de fissuration de la couche de matériaux traités aux liants hydrauliques, ce qui tend à établir l'efficacité de la couche granulaire vis-à-vis de la remontée des fissures. Dans le cas d'exécution imparfaite, on a relevé des détériorations rapides lorsque l'eau pouvait pénétrer et s'accumuler dans la couche granulaire.

2.2.6. Les chaussées en béton de ciment

- *Sollicitations dues au trafic*

Du fait du module d'élasticité élevé du béton de ciment, les efforts induits par le trafic sont essentiellement repris en flexion par la couche de béton. Les contraintes de compression transmises au sol sont faibles. Comme pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, la sollicitation déterminante est la contrainte de traction par flexion à la base.

Lors de la prise et des cycles thermiques, le béton subit des phases de retrait. La fissuration correspondante est généralement contrôlée, soit par la réalisation de joints transversaux, soit par la mise en place d'armatures continues longitudinales destinées à répartir par adhérence les déformations de retrait en créant de nombreuses fissures fines.



L'accroissement des contraintes transversales sous trafic en bord de dalles est d'autant plus important que le transfert de charge entre dalles est faible. La finesse des fissures du béton armé continu permet d'assurer une quasi continuité de la structure. Pour les structures en béton gouvonné, le transfert de charge est assuré par des pièces d'acier situées au droit des joints transversaux.

• *Influence des conditions d'environnement*

Pour ces structures, les sollicitations créées par les variations des conditions d'environnement peuvent être nettement supérieures à celles dues au trafic. C'est cependant la combinaison des sollicitations dues aux charges et au gradient thermique qui provoque l'endommagement par fatigue.

Les variations saisonnières de température entraînent des variations de longueur des dalles contrariées par le frottement sur le support. Les contraintes de traction (phase de retrait) qui en résultent sont d'autant plus faibles que la désolidarisation entre la dalle et son support est efficace, et que les dalles sont courtes.

Les variations journalières de la température ambiante créent dans les dalles des gradients thermiques. Les dalles ont alors tendance à se déformer. Il s'ensuit une modification des conditions d'appui sur le support conduisant à majorer l'effet du trafic.

• *Évolution du mode d'endommagement*

Pour les chaussées en béton classiques à dalles discontinues, la fissuration créée par des contraintes de traction par flexion excessives à la base des dalles est l'un des deux modes principaux de dégradation. Les dispositions constructives employées en France : surlargeur de chaussée et liaison des bandes longitudinales permettent de différer et de limiter l'apparition de fissures transversales et des cassures de coin de dalle.

Le second mode principal de dégradation tient à l'évolution des conditions d'appui au voisinage des joints et des fissures ; il s'agit des phénomènes de pompage. Cette évolution est essentiellement due à la présence d'eau à l'interface dalle-fondation dont l'effet se conjugue :

- à l'érodabilité du support,
- aux chargements transitoires répétés du trafic,
- à de faibles transferts de charges entre dalles, se traduisant par une dissymétrie des efforts et des déplacements de part et d'autre de ces discontinuités.

L'emploi de matériaux peu érodables en couche de fondation, et un drainage convenable aux interfaces (entre la dalle et son support, entre la dalle et l'accotement), sont des dispositions constructives, maintenant régulièrement adoptées en France, qui permettent d'éviter la dégradation des chaussées en béton par pompage puis décalage des dalles.

Le mode de dégradation des chaussées en béton armé continu reste encore mal connu. Les premières réalisations de ce type de structures sur le réseau français datent de 1983. Pour la fissuration, on peut penser que le processus d'initialisation des dégradations est comparable à celui des autres structures. Les discontinuités transversales possèdent en revanche, du fait des aciers et de la finesse des fissures, une qualité de transfert de charge pratiquement identique à celle obtenue au droit des joints longitudinaux.

3. ÉVOLUTION HISTORIQUE DE LA MÉTHODE FRANÇAISE DE DIMENSIONNEMENT

Ce chapitre fait un bref rappel historique pour situer l'état actuel de la méthode de dimensionnement des structures de chaussée développée en France, en apprécier les traits originaux et le processus d'évolution.

L'évolution de la méthode de dimensionnement ne peut être séparée de celle de deux séries de facteurs que sont :

- les matériaux de chaussée et les techniques de réalisation d'une part,
- les charges, le trafic des poids lourds² et la vitesse des véhicules d'autre part.

En France, jusqu'aux années 50, le dimensionnement des chaussées souples (qui représentaient la quasi-totalité des chaussées françaises) procédait d'une démarche empirique, menée par analogie avec les structures déjà construites. Pour les chaussées en matériaux non liés, il était fait usage dans certains cas de la méthode CBR imaginée par PORTER aux États-Unis en corrélant les résultats de l'observation de la tenue de chaussées en Californie avec la nature des sols, le trafic et l'épaisseur (1929), puis avec ceux d'un essai mécanique de poinçonnement (1930).

Pour les structures en béton, comme le premier tronçon de l'autoroute de l'Ouest construit en 1939, la conception s'inspirait alors des règles américaines faisant appel à des calculs de résistance des matériaux par la méthode de WESTERGAARD (1927) pour les dalles de béton.

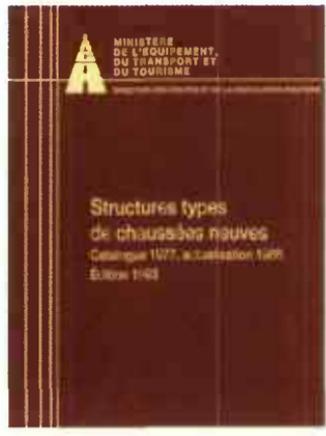
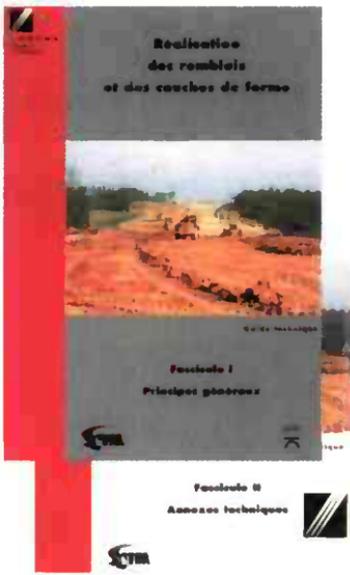
Les travaux théoriques de BURMISTER (1943) sur le calcul des contraintes et déformations d'un massif multicouche élastique semi-infini sous une charge circulaire verticale, ceux d'IVANOV en URSS et de MAC LEOD au Canada proposant une analyse du compartement des chaussées à partir de modèles élasto-plastiques peuvent être tenus comme les prémices du développement d'une démarche mécanique rationnelle du dimensionnement des chaussées.

L'intérêt des ingénieurs français pour une approche mécanique du dimensionnement des chaussées s'est manifesté dès la fin de la guerre. DE L'HORTET présentait en 1948 une explication rationnelle du compartement des chaussées en mettant en parallèle les données expérimentales de la méthode CBR et les résultats de calcul du problème de BOUSSINESQ. En 1959, JEFFROY et BACHELEZ publiaient une série d'abaques correspondant au fonctionnement de structures tricauches élastiques selon une méthode proche de celle de BURMISTER.

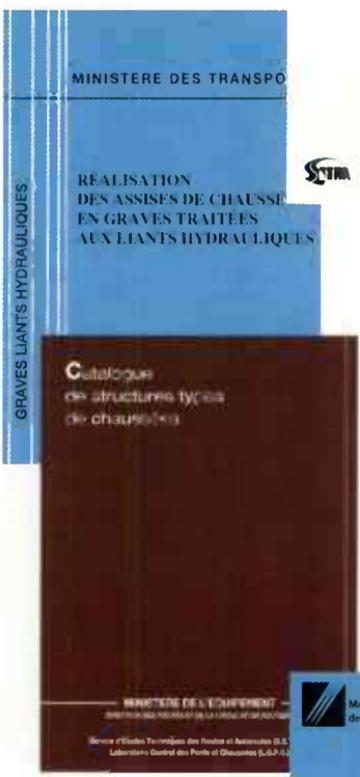
Cette époque a correspondu également en France au déclin des fondations de type "hérisson" et à la reconnaissance de l'effet structurel pour la diffusion des charges que pouvaient avoir les revêtements hydrocarbonés jusqu'alors considérés surtout pour leur rôle de tapis d'usure et de couche de roulement.

1. Les éléments suivants font des emprunts à l'exposé intractif rédigé en 1978 par ROUQUES en commentaires du Catalogue 77 des structures types des chaussées neuves du réseau national [34].

2. La valeur actuelle de 130 kN pour la charge maximale à l'essieu fut fixée en 1945.

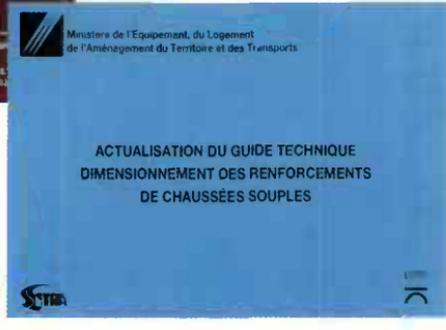


Ministère de l'Équipement, du Logement de l'Aménagement du Territoire et des Transports



ETABLISSEMENT DES COUPES TRANSVERSALES DE CHAUSSEES

Guide technique



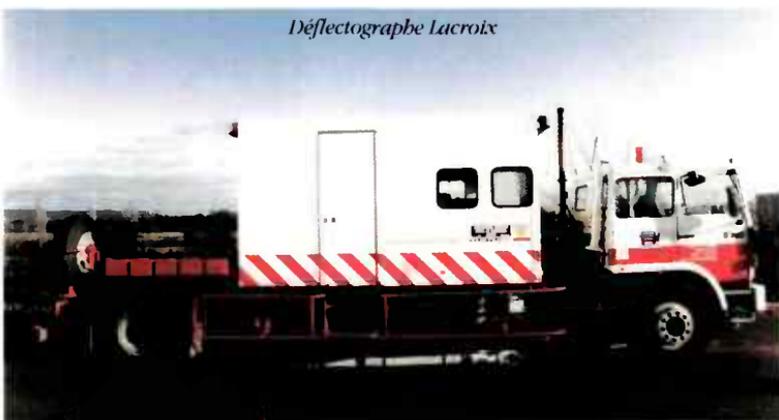
Les expérimentations conduites aux États-Unis dans les années 50 (essai HRB du Maryland en 1949, essais WASHO dans l'Idaho en 1953-54 et AASHO de 1955-61) tout en apportant des données essentielles pour la quantification de l'effet du trafic et de son cumul, alloient être la base d'une démarche empirique qui se situera en opposition avec l'école dite rationnelle.

Une position de synthèse était formalisée en 1964 dans un document de LÉGER intitulé *Recommandation pour le dimensionnement des chaussées d'autoroute et des chaussées à trafic lourd* et dans la note de commentaire l'accompagnant [33]. Ces documents comportaient déjà bon nombre des notions qui servent encore aujourd'hui au dimensionnement comme : un facteur d'équivalence des essieux (tiré alors de l'essai AASHO) ou la prise en compte de la rigidité des matériaux de chaussée à travers des coefficients d'équivalence d'épaisseur rattachés aux résultats de la théorie de l'élasticité.

L'incapacité des chaussées souples traditionnelles à résister au trafic lourd croissant a conduit à l'élaboration de matériaux de chaussée liés ayant une rigidité et une résistance plus élevées. Outre l'amélioration des techniques bitumineuses, se sont développées en France dans les années soixante les structures en matériaux traités aux liants hydrauliques, qualifiées de "semi-rigides". Faute de pouvoir utiliser pour ces structures un savoir-faire qui n'existait ni en France ni à l'étranger, il fallut imaginer de nouvelles méthodes d'étude.

Une autre idée importante se fit jour à la même époque, à savoir celle d'une standardisation des matériaux, afin de limiter dans des proportions raisonnables les variations de leurs propriétés mécaniques. Ceci s'est concrétisé à partir de 1968 par la publication, par la Direction des routes, d'une série de directives et recommandations précisant les formulations, les caractéristiques mécaniques minimales à atteindre ainsi que les méthodes de mise en œuvre.

Parallèlement, la connaissance sur le fonctionnement des chaussées était éclairée par les progrès accomplis en matière d'auscultation avec le développement de nouveaux appareillages (déflectographe Lacroix, vibreurs, déflectomètre à boulet, extensométrie...). Cet effort de recherche était motivé par les exigences de la politique des renforcements coordonnés lancée en 1969 sur un réseau fortement endommagé lors des hivers exceptionnels de 1955-1956 et 1962-1963.



Le parti pris de standardisation des matériaux fut prolongé par la publication en 1971 d'un premier *Catalogue de structures types de chaussées* [1] de la Direction des routes. Pour le dimensionnement de la structure, deux critères étaient pris en considération :

- une valeur de pression limite sur le sol de fondation déduite des abaques CBR existants,
- un allongement limite dans les cauches liées. L'allongement n'était en fait pas calculé directement mais évalué à partir de la déflexion à la surface de la chaussée.

Par ailleurs, du point de vue de la conception, le nombre d'interfaces était choisi aussi faible que possible tandis que les conditions contribuant à la qualité des matériaux mis en œuvre étaient prises en considération pour fixer des minima d'épaisseur. Le problème des effets du gel était abordé en examinant la potentialité de gonflement des sols supports, et en imposant une épaisseur minimale de matériaux non gélifs en rapport avec la profondeur atteinte par le gel.

L'utilisation de l'informatique pour la résolution numérique du problème des multicauches allait lever les limitations sur le nombre de cauches et permettre une analyse plus précise, complète et systématique des contraintes et déformations dans les structures de chaussée. Ainsi, le logiciel ALUZÉ [38] développé par le LCPC à partir de 1964 fut utilisé pour certains calculs de vérification de l'ordre de grandeur des déformations en traction des cauches liées des structures du catalogue de 1971. Il fut ensuite employé de façon systématique pour la définition des structures du nouveau *Catalogue des structures types des chaussées neuves* publié en 1977 [2].

Dans la période séparant la publication des deux catalogues, des progrès importants ont été faits dans la connaissance du comportement des matériaux de chaussée : déformabilité, résistance sous chargement monotone et en fatigue. D'autre part, les mesures faites sur les structures de chaussée confirmaient les valeurs de déformation des cauches liées que l'on pouvait tirer du calcul, marquant ainsi la justesse de l'application de la démarche rationnelle.

Ces connaissances et résultats permirent de fonder davantage le dimensionnement sur les outils de la mécanique rationnelle. Si nombre des principes retenus pour le catalogue de 1971 ont été conservés, des améliorations conséquentes virent le jour comme :

- les notions de plate-forme support prenant en compte l'apport mécanique de la couche de forme,
- l'introduction de la notion de risque et la formalisation d'un calcul de dimensionnement fait par référence à une certaine probabilité de rupture.

Une méthode originale de vérification de la tenue au dégel était par ailleurs conçue.

La méthodologie élaborée avec la définition du catalogue 1977 puis du *Guide de dimensionnement des renforcements des chaussées souples* [3] a déterminé les principes d'une démarche de dimensionnement rationnelle conservés à ce jour, et qu'explicité et développe le présent document.

Les solutions préconisées par ces catalogues adaptés aux chaussées à moyen et fort trafic s'inscrivaient dans une stratégie unique de conception des chaussées qui correspondait à un choix de longue durabilité des qualités structurelles et qu'accompagnait

une politique d'entretien préventif. Pour les routes à faible trafic, un cadre de conception plus souple était proposé, en 1981, par le *Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic* [4] qui permettait de prendre en considération des durées de service plus courtes. Du point de vue de la méthode de dimensionnement des chaussées, le manuel conjugait l'utilisation des résultats du calcul des sollicitations pour déterminer les épaisseurs des couches d'assise, avec l'analyse de l'observation du compartement de chaussées similaires pour le choix de la couche de roulement bitumineuse (le critère fixant le dimensionnement étant généralement celui de la déformation verticale du sol support).

Par sa conception, le manuel permettait également de retenir l'emploi en couche de chaussée de matériaux locaux ne répondant pas à l'ensemble des exigences fixées par les directives. Ce manuel allait donner naissance à des catalogues régionaux de chaussées.

Depuis la parution de ces documents, les principes qui fondent la méthode de dimensionnement n'ont pas été remis en question. Les évolutions au cours des dernières années se sont traduites par l'émergence de liants modifiés, de matériaux de chaussée ayant de meilleures caractéristiques, de nouvelles structures de chaussée comme les structures inverses ou les chaussées en béton armé continu. Par ailleurs l'amélioration des techniques de fabrication et de mise en œuvre permettait de réduire certains facteurs de dispersion. Ces progrès ont en particulier été introduits dans le *Manuel de conception des chaussées d'autoroutes* [6] dont la première édition a été publiée par Scétauroute en 1986.

Sous un autre aspect, la diversification des maîtres d'ouvrage et gestionnaires du domaine routier (État, collectivités territoriales, sociétés concessionnaires d'autoroutes) s'est traduite par une différenciation, selon les réseaux, des hypothèses relatives à la stratégie d'investissement et d'entretien ainsi que des exigences de qualité des matériaux.

Les études se poursuivent selon cette démarche de dimensionnement dite rationnelle, en particulier pour s'affranchir des limites des modèles élastiques continus encore à la base des calculs effectués en pratique. Il s'agit de tirer parti des apports des méthodes de calcul numérique comme celle des éléments finis afin de mieux appréhender les effets des discontinuités géométriques (joints, fissures) et de la non-linéarité de comportement des matériaux. Ces approches sont cependant encore pour une large part du domaine de la recherche et ne sont utilisées en pratique que pour certains cas particuliers.

4. GRANDES LIGNES DE LA PRÉSENTE MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT

Les choix de conception des structures de chaussée neuve et des travaux de réhabilitation doivent d'abord être examinés dans un cadre technico-économique large où interviennent les choix de politique de gestion des réseaux routiers faits par le maître d'ouvrage, comme indiqué dans la partie II.

Pour la phase de dimensionnement proprement dite, la méthode française relève d'une démarche combinant les apports de la mécanique rationnelle et des éléments expérimentaux :

- les méthodes de la mécanique sont employées pour définir un modèle de la structure de chaussée et calculer les sollicitations engendrées par la charge standard correspondant à l'essieu légal ;
- les résultats d'essais de laboratoire sur l'endommagement en fatigue des matériaux de chaussée sont ensuite utilisés pour apprécier la résistance en fatigue de la structure en retenant l'hypothèse d'additivité des dommages de MINER ;
- les connaissances tirées de l'observation du compartement de chaussées réelles (données provenant de sections tests ou d'expériences faites sur le manège d'étude des structures routières du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) interviennent enfin pour :
 - préciser le critère de vérification vis-à-vis des déformations permanentes du sol support et des couches non liées,
 - caler les résultats du modèle de calcul.

De cette manière, il est tenu compte globalement, d'une part d'effets que le modèle mathématique ne peut représenter en raison des simplifications faites, et d'autre part des biais attachés à la représentativité des essais de laboratoire pour la description des propriétés des matériaux.

L'une des caractéristiques de la méthode française de dimensionnement est d'adapter une démarche de calcul probabiliste. Comme ceci est explicité un peu plus loin, on ne calcule pas les structures pour une durée de vie donnée mais on évalue l'évolution dans le temps de la probabilité cumulée de rupture.

Le détail de la caractérisation mécanique des sols supports et des matériaux de chaussées est exposé dans les parties IV et V. Les données requises par la méthode pour le dimensionnement des structures de chaussées neuves sont décrites par la partie VI (VI. 2.), qui précise ensuite les étapes de la démarche (VI. 3.) avant d'expliquer pour chaque technique les modèles et critères retenus (VI. 4.).

Les paragraphes qui suivent introduisent ces différents développements en présentant les principaux concepts retenus.

4.1. LE CARACTÈRE PROBABILISTE DU DIMENSIONNEMENT

L'une des particularités fondamentales du dimensionnement des chaussées est son caractère probabiliste. Ceci tient à l'importance de la dispersion et du caractère aléatoire des divers facteurs ayant un effet significatif sur la tenue dans le temps de la chaussée.

Si le processus d'élaboration des matériaux des couches de chaussée et les précautions prises à la mise en œuvre permettent de limiter certaines variations de caractéristiques, le développement de l'endommagement par fatigue garde intrinsèquement un caractère aléatoire dont témoigne la dispersion des résultats d'essai de fatigue sur éprouvette en laboratoire. A ces aspects propres aux matériaux s'ajoute la variabilité de l'épaisseur des couches de chaussée réalisées sur chantier, dispersion qui dépend des méthodes d'exécution et de la qualité des travaux.

Enfin, les facteurs qui sont la cause même des sollicitations dans la chaussée, à savoir les paramètres d'environnement et le trafic, varient au cours de la durée de vie de la chaussée sans qu'il soit souvent possible d'en faire une prévision précise (occurrence et sévérité des périodes de gel, taux de croissance et composition du trafic...).

La conjonction de cet ensemble de sources d'incertitude conduit à raisonner en termes probabilistes pour apprécier l'évaluation du risque de dégradation de la chaussée. C'est ce que traduisent les concepts de durée initiale et de risque de calcul définis au paragraphe 4.2. Le paragraphe 4.4. explicite la manière par laquelle les valeurs de dispersion affectant le compartement en fatigue et les épaisseurs des couches réalisées interviennent dans la détermination des déformations et contraintes admissibles.

4.2. LES CONCEPTS DE DURÉE INITIALE ET DE RISQUE DE CALCUL

La notion de "durée de vie" d'une chaussée est une notion difficilement définissable et peu opératoire. D'une part les dégradations se développent de manière non homogène, et d'autre part des considérations de sécurité et d'économie font que des opérations d'entretien seront toujours effectuées avant qu'il n'y ait destruction complète de la structure de chaussée. Il faut donc chercher un autre terme de référence pour le dimensionnement des projets de chaussée.

Compte tenu du caractère probabiliste exposé plus haut, l'objectif qui peut être retenu est que la probabilité d'apparition de dégradations (d'une nature ou d'une amplitude donnée) avant une période donnée de p années, soit inférieure à une valeur fixée.

Cette probabilité de rupture est appelée le "risque de calcul", et la période de p années la "durée initiale de calcul". Par la suite, on considèrera que le risque de calcul est ainsi défini :

Un risque de $x\%$ sur une période de p années pris pour le dimensionnement de la chaussée, c'est la probabilité pour qu'apparaissent au cours de ces p années des désordres qui impliqueraient des travaux de renforcement assimilables à une reconstruction de la chaussée, en l'absence de toute intervention d'entretien structurel dans l'intervalle.

4.3. LES FACTEURS PRIS EN COMPTE POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES

La méthode de dimensionnement prend en considération les facteurs suivants :

- le trafic,

- l'environnement (données climatiques),
- la plate-forme support de chaussée,
- les matériaux de chaussée,
- la qualité de la réalisation.

4.3.1. Le trafic

Les chaussées sont dimensionnées vis-à-vis du trafic poids lourds. La méthode de calcul implique la conversion, en un nombre cumulé NE de passages d'essieu de référence, du trafic réel constitué de combinaisons variables de véhicules ayant des charges à l'essieu et des configurations d'essieu différentes. **En France, l'essieu de référence est l'essieu isolé à roues jumelées de 130 kN.**

Les relations d'équivalence entre essieux différents sont des équivalences d'endommagement unitaire. Elles sont tirées de calculs des sollicitations dans la structure de chaussée et tiennent compte du compartement en fatigue des matériaux. Il en résulte que l'agressivité relative des essieux ne s'exprime pas par une relation unique ; les valeurs de coefficient d'agressivité dépendent du matériau, du type d'endommagement et de la structure de chaussée. Pour les trafics moyens qui ont pu être observés en France, la partie VI. 2. 1. donne les coefficients pouvant être retenus pour les divers types de chaussées.

Dans l'annexe A.5. on trouvera un exemple détaillé de calcul d'agressivité d'un trafic donné pour un certain type de structure de chaussée. La démarche proposée peut aussi être suivie pour déterminer le trafic cumulé équivalent pour un essieu de référence différent de l'essieu légal français, ce qui permet d'étendre la méthode à d'autres contextes.

Par ailleurs, par commodité (pour le choix en particulier entre des classes de produits au de matériaux de chaussée), il est fait usage de la notion de classe de trafic (VI. 2.1.). La classe de trafic T1 est déterminée à partir du trafic poids lourd journalier moyen (MJA) de la voie la plus chargée, pendant l'année de mise en service. Les classes sont définies par les limites données par le tableau I.1.

Tableau I.1. – Définition des classes de trafic

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

4.3.2. L'environnement – données climatiques

La température influence le compartement des différents types de chaussées :

- en ce qu'elle affecte les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux,
- par les variations cycliques d'ouverture des fissures de retrait des matériaux traités aux liants hydrauliques,
- par les déformations de dalle dues aux gradients thermiques dans les chaussées rigides.

Pour les chaussées bitumineuses, les calculs de dimensionnement sont faits, le plus souvent, en considérant une température du matériau de chaussée constante équivalente. Pour le territoire métropolitain français, il est généralement retenu une valeur de 15°C . Dans l'annexe A.6. on trouvera un calcul détaillé de température équivalente pour une distribution annuelle de température donnée. Comme pour l'analyse de l'agressivité du trafic, le calcul de température équivalente se fonde sur une équivalence de dommages cumulés. L'application de cette démarche permet d'étendre la méthode française de dimensionnement à d'autres contextes climatiques.

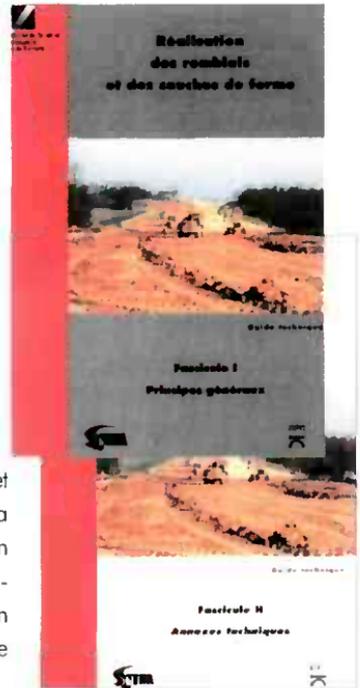
L'appréciation de la tenue de la chaussée lors des phases de gel et dégel est faite par une vérification menée séparément de l'étude de la tenue en fatigue sous trafic. Cette vérification du comportement au dégel (décrite partie VI. 5.) vise à définir un indice de gel admissible pour la chaussée. Cette valeur correspond à une limite en-deçà de laquelle les phénomènes de gonflement et de perte de portance sont suffisamment modérés pour qu'il n'apparaisse pas de désordres et qu'il n'y ait pas lieu d'introduire de restriction de circulation. L'incidence enfin de l'état hydrique des sols sur la portance de la plate-forme support est évoquée dans le paragraphe suivant.

4.3.3. La plate-forme support

La caractérisation des sols supports, le choix des matériaux utilisables pour la couche de forme et leurs conditions de mise en œuvre sont ceux fixés en France par le guide technique *Réalisation des remblais et des couches de forme* [19] publié en 1992.

La caractérisation mécanique du sol support et de la couche de forme est précisée dans la partie IV. Pour le dimensionnement de la structure de chaussée, en général, le sol support est décrit par une valeur de module d'Young réversible considérée comme représentative de l'état hydrique le plus défavorable (période de dégel exclue).

S'il est reconnu que le drainage de la plate-forme et de l'assise est un facteur important pour la tenue de la chaussée, le document ne traite pas de la conception des dispositifs de drainage. Dans la méthode de dimensionnement, l'effet du drainage intervient, par son incidence sur la portance de la plate-forme, dans le choix du module affecté au sol support.



4.3.4. Les matériaux de chaussée

Un ensemble de normes codifie les différentes familles de matériaux de chaussée, définissant pour chacune d'elles des classes selon la qualité des constituants et certaines pro-

propriétés physiques et mécaniques des mélanges. La méthode de dimensionnement s'applique aux familles de matériaux ainsi définies.

Dans le cas de l'emploi de matériaux de chaussée non conformes sur certains aspects aux normes, ou non couverts par une norme, seule une étude de laboratoire particulière, complétée le cas échéant par des planches expérimentales, peut permettre de préciser leur domaine d'emploi. Les caractéristiques mécaniques à retenir pour le calcul de dimensionnement seront sélectionnées à partir de ces études, par référence à celles du matériau normalisé dont le comportement est le plus proche.

Pour les matériaux normalisés, les valeurs de résistance mécanique et de déformabilité retenues, tirées d'études en laboratoire, sont déduites des valeurs moyennes obtenues sur la formule de base établie conformément aux dispositions des normes définissant les méthodologies d'étude. En l'absence d'étude spécifique, le document de dimensionnement se réfère en général aux valeurs seuils minimales fixées par les normes.

Le comportement en fatigue des matériaux est décrit à partir de résultats d'essais de laboratoire normalisés. Compte-tenu du caractère intrinsèquement dispersé des résultats d'essais de fatigue, des valeurs caractéristiques de cette dispersion tirées de synthèses sur de nombreuses études sont indiquées pour les différentes familles de matériaux. Cette dispersion est prise en compte pour la détermination des sollicitations admissibles ainsi qu'il est expliqué dans le paragraphe 4.4.

Ces points sont développés par la partie V qui donne des valeurs de référence pour les caractéristiques mécaniques nécessaires à la méthode de dimensionnement.

4.3.5. La qualité de la réalisation

Les dispositions de la présente méthode de dimensionnement s'appliquent à des situations pour lesquelles les prescriptions et les règles de l'art concernant la fabrication et la mise en œuvre des matériaux sont respectées. Celles-ci permettent d'assurer l'homogénéité des compositions et des caractéristiques mécaniques.

Ces facteurs étant maîtrisés, il subsiste néanmoins le fait que la réalisation est affectée de variations aléatoires d'épaisseur des couches. Le calcul de dimensionnement prend en compte cette dispersion en retenant des valeurs tirées d'observations sur des chantiers normalement conduits, et modulées selon la nature des méthodes de mise en œuvre et de contrôle utilisées.

4.4. DÉTERMINATION DES SOLLICITATIONS ADMISSIBLES

Les valeurs des sollicitations admissibles dans les couches de chaussée sont déterminées à partir des caractéristiques du comportement en fatigue des matériaux, du trafic cumulé et du risque de calcul. Un coefficient multiplicateur de "calage" est introduit pour corriger les écarts entre les prédictions tirées de la démarche de calcul et l'observation du comportement des chaussées.

4.4.1. Relation entre sollicitations admissibles et risque de calcul

La variabilité des caractéristiques mécaniques des matériaux de chaussée étant considérée comme maintenue dans des limites relativement étroites pour les matériaux élaborés et mis en œuvre conformément aux normes et directives, les seuls facteurs pris en considération pour rendre compte de la variabilité de l'apparition et du développement des dégradations des chaussées sont les dispersions sur :

- les résultats d'essais en fatigue¹,
- l'épaisseur des couches lors de l'exécution.

La courbe de fatigue tirée des essais de laboratoire est définie pour une probabilité de rupture de 50 %. Les résultats des essais, exprimés en $\log N$ (logarithme décimal du nombre de cycles à la rupture) sont distribués suivant une loi normale avec un écart-type noté SN . L'épaisseur des couches est considérée comme étant distribuée également selon une loi normale, d'écart-type noté Sh .

Considérons ainsi le cas d'une chaussée devant être conçue pour une durée initiale de calcul pendant laquelle le trafic cumulé attendu, exprimé en nombre équivalent d'essieu de référence, est égal à NE . Calculer cette chaussée pour un risque r sur cette période, c'est la dimensionner pour que la probabilité de rupture pour NE cycles soit au plus égale à r .

Le risque, r , est l'intégrale de la densité de probabilité de la variable $\log N$ réduite. L'écart-type, δ , associé à la variable $\log N$, se déduit de la combinaison des facteurs de dispersion sur la loi de fatigue et sur l'épaisseur des couches, par la relation :

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0,5}$$

avec,

c : coefficient reliant la variation de déformation (ou de contrainte) dans la chaussée à la variation aléatoire d'épaisseur, Δh , ($\log \varepsilon = \log \varepsilon_0 - c \Delta h$).

b : pente de la loi de fatigue du matériau exprimée sous la forme d'une loi bilogarithmique.

La figure I.4.1. illustre la manière dont se déduit la valeur de la sollicitation admissible pour un trafic cumulé NE et un risque r donnés. Les expressions reliant déformation (ou contrainte) admissible, nombre de cycles équivalents NE et risque de calcul, r , sont données en VI. 4.

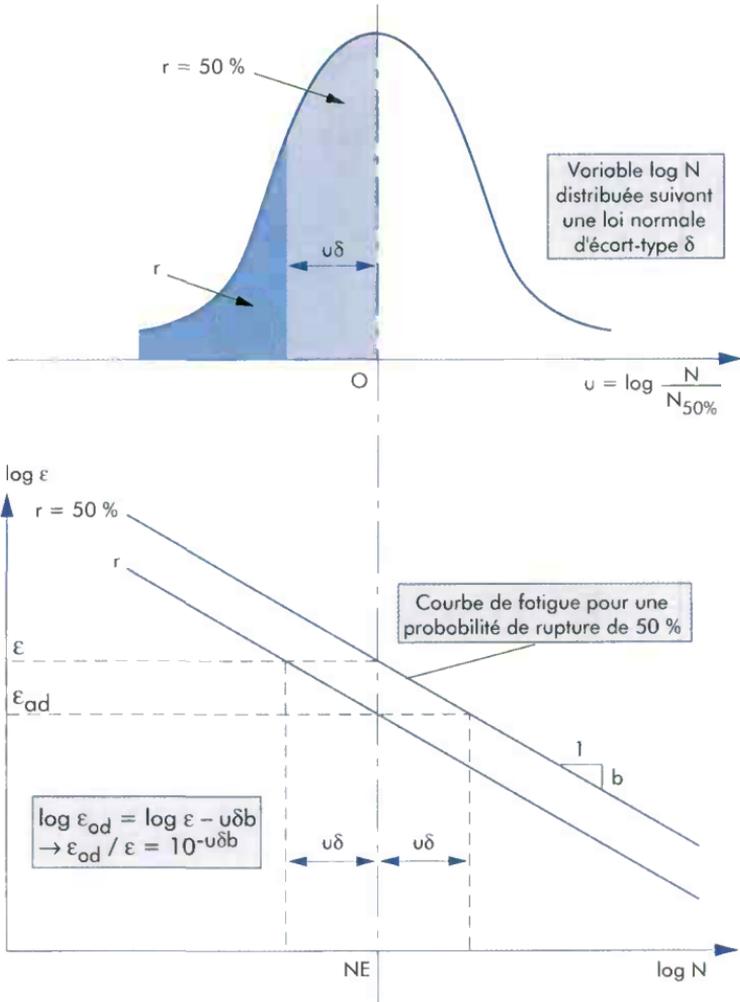
4.4.2. Le coefficient de calage

Le calcul des sollicitations admissibles pour les couches de chaussée liées est affecté d'un coefficient de calage, noté k_c , qui corrige l'écart entre les prédictions de la démarche de calcul et l'observation du comportement des chaussées.

1. Il est fait implicitement l'hypothèse que la même dispersion affectera l'accurrence de la rupture des couches de chaussée, tous les autres facteurs étant égaux par ailleurs.

Figure I.4.1. – Détermination de la déformation admissible, ϵ_{ad} à partir des résultats d'essais de fatigue

Froctile (u)	-0,84	-1,04	-1,28	-1,65	-2,05
Risque (r) (%)	20	15	10	5	2



Les valeurs de k_c proviennent pour la plupart d'analyses inverses du comportement de différentes chaussées neuves et renforcées, effectuées dans la période 1975 à 1985.

Ces valeurs de coefficient de calage sont attachées :

- à des matériaux de chaussée conformes aux directives publiées à l'époque par la Direction des routes,
- à un modèle de calcul multicouches élastique linéaire,
- à une description du comportement en fatigue des matériaux issue des essais de fatigue en flexion tels que les définissent maintenant les normes référencées dans le présent document.

L'emploi direct des valeurs de k_c données par ce document dans le cas de modèles de calcul ou de protocoles d'essais en fatigue différents de ceux décrits ici (par exemple calculs par la méthode des éléments finis avec des lois de comportement non-linéaire, ou essais de fatigue à effort imposé et temps de repos pour des matériaux bitumineux), n'est pas licite.

La détermination d'une valeur de coefficient de calage pour des matériaux nouveaux passe par l'analyse du comportement de chaussées en circulation sur une période de temps suffisante pour tenir compte des effets climatiques saisonniers. L'annexe A de la norme NF P 98-086, *Dimensionnement des chaussées routières : éléments à prendre en compte pour le calcul de dimensionnement*, précise l'approche pour déterminer les coefficients de calage. Le manège de fatigue du LCPC, intéressant comme moyen accéléré d'expérimentation, permet d'obtenir des enseignements pour le calage, mais le raisonnement doit ici être mené par comparaison avec des matériaux et structures au comportement bien connu sur route.

4.5. DÉFINITION DES ÉPAISSEURS DE COUCHES

Les épaisseurs de matériaux tirées des calculs déterminant les sollicitations dans la structure sont ajustées pour fixer les épaisseurs des couches qui seront réalisées afin :

- de tenir compte des contraintes technologiques d'épaisseurs minimale et maximale pour atteindre les objectifs de compacité et d'uni,
- de minimiser le nombre d'interfaces et par là réduire les risques de défaut de liaison à ces niveaux,
- d'assurer une protection suffisante des assises traitées vis-à-vis de phénomènes non appréhendés encore par les calculs (remontée de fissures en particulier).

Page laissée blanche intentionnellement



II. RELATION ENTRE LES CHOIX DE CONCEPTION DES CHAUSSÉES ET DE GESTION D'UN RÉSEAU ROUTIER

1. DE LA HIÉRARCHISATION DES RÉSEAUX ROUTIERS AUX CHOIX EN MATIÈRE DE CONCEPTION DES CHAUSSÉES

2. LES CHOIX DE NIVEAU DE SERVICE

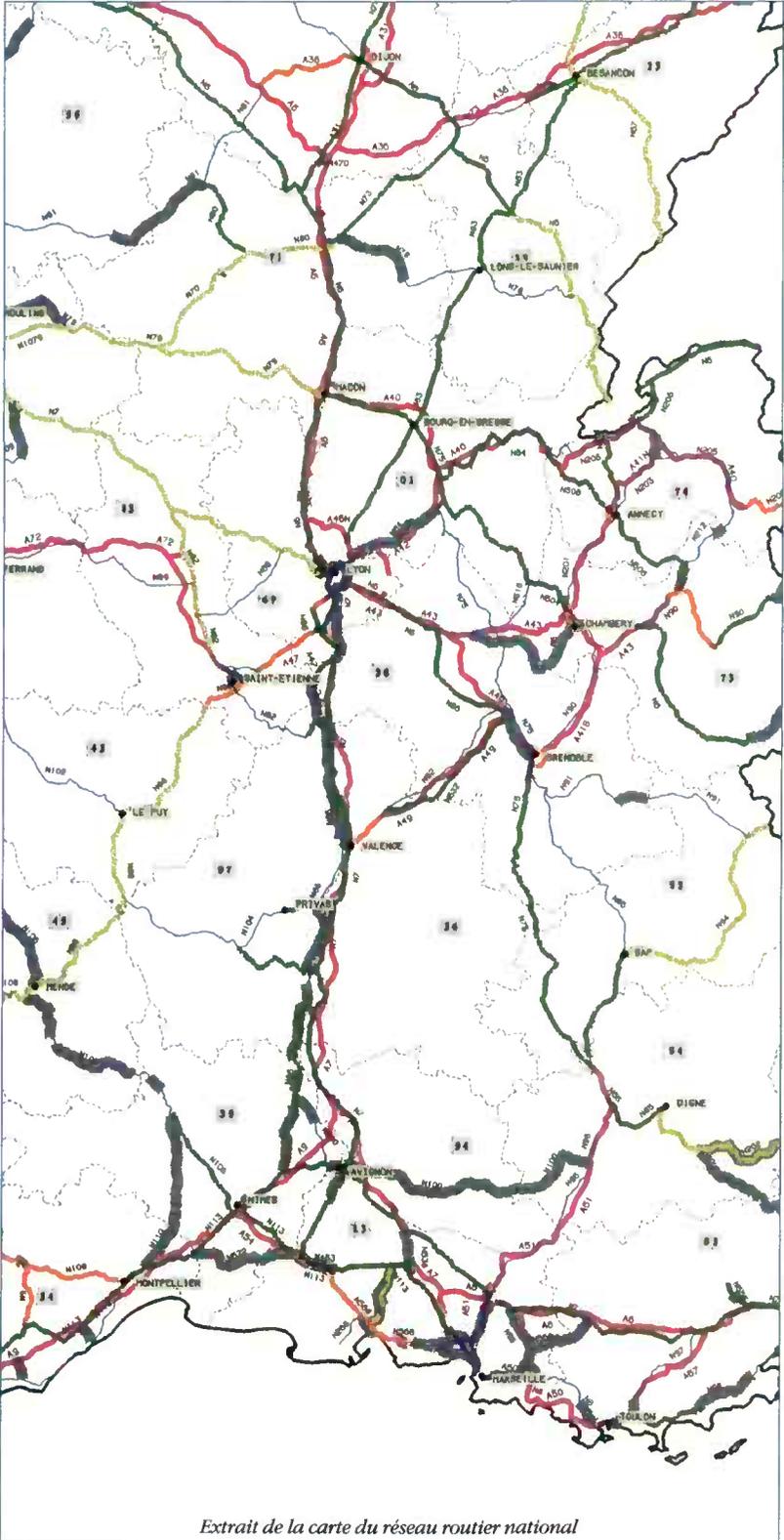
- 2.1. LA NOTION DE NIVEAU DE SERVICE
- 2.2. ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DU NIVEAU DE SERVICE
- 2.3. CRITÈRES D'APPRÉCIATION DU NIVEAU DE SERVICE
- 2.4. RELATIONS AVEC LES CHOIX DE CONCEPTION DE LA CHAUSSÉE

3. LES CHOIX DE STRATÉGIE D'INVESTISSEMENT ET D'ENTRETIEN

- 3.1. CHOIX D'UNE DURÉE DE RÉFÉRENCE POUR LA COMPARAISON DES STRATÉGIES
- 3.2. LES DIFFÉRENTES STRATÉGIES INVESTISSEMENT – ENTRETIEN EN RELATION
AVEC LE CHOIX DU NIVEAU DE SERVICE
- 3.3. ÉLÉMENTS ÉCONOMIQUES POUR LE CHOIX DE LA STRATÉGIE
- 3.4. IMPLICATIONS SUR LE CHOIX DES TECHNIQUES DE CHAUSSÉE

4. ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE D'OPTIMISATION POUR LES CHOIX DE DIMENSIONNEMENT

- 4.1. ÉTUDE D'UNE POSSIBILITÉ D'INTÉGRATION DE LA COUCHE DE FORME DANS LA STRUCTURE
DE CHAUSSÉE
- 4.2. CHOIX DES TECHNIQUES DE CHAUSSÉE
- 4.3. PRISE EN COMPTE DE LA QUALITÉ OBTENUE SUR CHANTIER
ET DES DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES DANS LE DIMENSIONNEMENT
- 4.4. CHIFFRAGE DU COUT GLOBAL CONSTRUCTION + ENTRETIEN



1. DE LA HIÉRARCHISATION DES RÉSEAUX ROUTIERS AUX CHOIX EN MATIÈRE DE CONCEPTION DES CHAUSSÉES

La question du dimensionnement des structures de chaussée, en travaux neufs et en réhabilitation, objet central du présent document, doit être examinée dans le cadre beaucoup plus large des choix de politique de gestion du réseau routier considéré.

Une politique routière s'organise d'abord, pour le maître d'ouvrage, autour d'une hiérarchisation de son réseau. Cette hiérarchisation, exprimée par un classement en sous-ensembles homogènes des différentes routes, est le résultat d'une analyse socio-économique de l'importance attachée à chaque liaison.

Les conclusions de cette analyse socio-économique sont traduites en objectifs (éventuellement différenciés par catégorie de routes) relatifs aux services rendus à l'usager et à la manière dont sont prises en compte les contraintes d'environnement. Les objectifs ainsi poursuivis sont exprimés en termes de niveau de service (notion explicitée dans le chapitre suivant).

Ce niveau de service est variable dans le temps et diminue avec l'usure de la route. La réflexion sur les partis pris constructifs initiaux doit aussi intégrer les interventions ultérieures en entretien qui seront nécessaires pour maintenir les objectifs de qualité d'usage visés au départ. Ceci conduit à définir une stratégie globale d'investissement et d'entretien ; la sélection de cette stratégie tend en général vers la recherche d'un optimum économique sous contrainte budgétaire.

L'étude de dimensionnement de la structure de chaussée et des variantes de conception intervient donc en aval, au stade du projet, en fonction des objectifs généraux de gestion mentionnés ci-dessus.

Appareil d'auscultation multifonction CALAO



2. LES CHOIX DE NIVEAU DE SERVICE

2.1. LA NOTION DE NIVEAU DE SERVICE

La notion de niveau de service est une notion globale qui permet d'exprimer, par l'intermédiaire d'indicateurs quantifiables si possible mais pour certains seulement qualitatifs, l'aptitude de la route à satisfaire les besoins tant objectifs que subjectifs des usagers et du maître d'ouvrage.

Les conditions offertes à la circulation des usagers sur la route sont éminemment variables. Elles dépendent du tracé et de l'ensemble des composantes de la route : chaussée, accotements, signalisation... Pour obtenir, sur une classe homogène d'un réseau routier, la cohérence entre les enjeux économiques de la liaison routière et les moyens financiers et techniques nécessaires pour assurer les conditions de circulation recherchées, il faut :

- caractériser la qualité de la route vis-à-vis du service rendu à l'utilisateur et du point de vue des riverains (bruit et gêne occasionnée par les travaux d'entretien notamment),
- connaître l'incidence de ce choix d'objectif sur les coûts supportés par les usagers et par la collectivité.

On considère généralement cinq groupes d'objectifs dans l'analyse du service rendu par la route :

- la sécurité,
- le temps et le coût du parcours,
- la régularité du service rendu,
- le confort de conduite,
- l'agrément du parcours.

Les quatre premiers dépendent entre autres de la nature et de l'état de la chaussée, par ses caractéristiques de surface et structurelles.

La **sécurité** tient, pour les aspects liés aux caractéristiques du revêtement de la chaussée :

- à l'adhérence longitudinale et transversale dans les zones de freinage et de virage ;
- aux irrégularités de profil (uni longitudinal dans les courtes longueurs d'ondes, et uni transversal).
Celles-ci peuvent conduire à des délestages de roues et à la formation de zones d'accumulation d'eau avec les risques associés d'aquaplanage;
- au temps nécessaire à l'écoulement des eaux de ruissellement.

Vis-à-vis du **temps de parcours** et de la **régularité du service rendu**, les perturbations du trafic directement liées à la chaussée ont deux origines :

- les travaux d'entretien,
- la pose de barrières de dégel.

Quant au **confort de conduite**, on considère trois aspects :

- le confort attaché aux accélérations verticales causées par les défauts d'uni et les dégradations de la chaussée,
- le confort sonore lié au bruit de roulement,
- le confort visuel qui dépend de l'homogénéité, de la couleur et de la brillance du revêtement.

2.2. ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DU NIVEAU DE SERVICE

Le niveau de service est variable dans le temps et décroît avec l'usure de la route. La traduction du niveau de service en indicateurs d'état relatifs aux différents objectifs indiqués plus haut permet de définir des seuils qui guideront les décisions de déclenchement des opérations d'entretien.

2.3. CRITERES D'APPRECIATION DU NIVEAU DE SERVICE

La quantification des niveaux de service [17] se heurte à différentes difficultés dont :

- la possibilité de trouver des indicateurs mesurables de tous les aspects participant à la notion de niveau de service,
- le caractère subjectif de la perception par les usagers.

Certains pays ont opté pour des concepts d'index global de niveau de service des chaussées par l'intermédiaire d'une corrélation entre la perception des usagers et des paramètres physiques tels que l'adhérence, l'uni, la profondeur d'ornièrre... Le niveau de service de la route est alors traduit par une seule valeur numérique. Cette méthode a pour avantage sa simplicité d'utilisation pour établir des priorités d'entretien. Mais, pour deux valeurs égales d'un index global, la nature des travaux d'entretien pour retrouver le même niveau de service peut être très différente.

En France, un tel système n'a pas été retenu pour quantifier le niveau de service. L'évaluation de l'état d'une route est mise en relation avec l'analyse des besoins en travaux d'entretien.

Vis-à-vis de l'aspect sécurité, pour la structure de chaussée, ce sont essentiellement les caractéristiques de surface de la couche de roulement qui sont à prendre en considération. Aux divers facteurs (adhérence, uni longitudinal et transversal) correspondent des moyens de mesure permettant une quantification.

Pour la régularité du service rendu, la durée cumulée d'interruption du trafic est un indicateur simple quantifiable du niveau de service. La gêne occasionnée par les travaux d'entretien peut être estimée à partir de scénarios d'évaluation dans le temps de la chaussée et de l'expérience du service gestionnaire. La perturbation du trafic associée à la mise en place de limitations d'usage temporaires dictées par les conditions climatiques (barrières de dégel), afin de préserver le patrimoine que représente l'état structurel de la chaussée, a un caractère probabiliste pour la zone climatique de la France (hivers très rigoureux peu fréquents mais possibles à l'échelle de la durée de service d'une chaussée). Ce risque de perturbation est évalué en fonction de la probabilité d'apparition d'un hiver plus rigoureux que celui pris en référence pour le dimensionnement de la structure.

Les paramètres influant sur le confort sont, eux, nombreux ; certains peuvent être quantifiés par des indicateurs mesurables tels que :

- la mesure du bruit de roulement pour le confort sonore,
- la mesure de l'uni longitudinal pour le confort lié aux accélérations verticales...

2.4. RELATIONS AVEC LES CHOIX DE CONCEPTION DE LA CHAUSSÉE

La conception de la chaussée (choix de la nature et du dimensionnement de la couche de roulement et des couches d'assise) a bien sûr une incidence directe sur la nature et la fréquence des travaux d'entretien nécessaires au maintien du niveau de service recherché. Le choix de niveau initial de service se répercute ainsi sur le choix de la couche de roulement. La nature du revêtement, la granularité et la forme des granulats, la porosité et la formulation, conditionnent l'adhérence et la drainabilité (sécurité), le niveau du bruit de roulement (confort sonore) ainsi que la couleur et la brillance (confort visuel). Du choix de la nature des granulats et de la formulation dépendra l'évolution dans le temps du niveau de service. Ainsi, les caractéristiques d'adhérence diminuent avec le polissage des granulats de surface, la fermeture des enrobés, le départ de granulats...

L'état de la structure du corps de chaussée et son évolution affectent aussi, par les déformations du profil de la route et la présence de fissures, le niveau de service recherché. Il doit ainsi y avoir cohérence entre les choix faits pour les couches de roulement et d'assise.

C'est enfin le dimensionnement retenu pour le corps de chaussée qui déterminera les seuils d'interruption éventuelle de trafic associés aux conditions climatiques.

3. LES CHOIX DE STRATÉGIE D'INVESTISSEMENT ET D'ENTRETIEN

Choisir une stratégie d'investissement et d'entretien, c'est définir les moyens pour maintenir dans le temps le niveau de service qui a été fixé comme objectif sur une partie homogène du réseau routier. Par "moyens", il faut entendre les coûts de construction (investissement initial ou de réhabilitation dans le cas de chaussées existantes dégradées) et les coûts d'entretien ultérieurs.

L'étude comparative de ces stratégies nécessite une approche économique, en raisonnant à long terme et en tenant compte d'éléments aléatoires comme les hivers rigoureux et la croissance du trafic. Elle consiste à comparer pour différentes options :

- les dépenses, c'est-à-dire les coûts des travaux de construction, de remise en état et d'entretien,
- aux avantages associés principalement aux améliorations de sécurité, aux gains de temps, aux réductions de coûts de fonctionnement des véhicules et aux effets indirects sur l'économie.

Le chiffrage se fait en terme de bilan actualisé, mais d'autres considérations peuvent intervenir pour tenir compte d'avantages non monétarisables.

La stratégie généralement recherchée est celle qui minimise les dépenses actualisées sur une période de référence en fonction des contraintes budgétaires. La teneur de la suite de ce chapitre est limitée à l'analyse des dépenses de construction et d'entretien.

3.1. CHOIX D'UNE DURÉE DE RÉFÉRENCE POUR LA COMPARAISON DES STRATÉGIES

La durée de référence doit être prise suffisamment longue :

- pour faire apparaître des différences de comportement (et donc d'entretien) entre des chaussées conçues pour des durées et des risques de calcul différents ;
- pour que des interventions d'entretien structurel soient nécessaires sur les chaussées dont l'évolution des dégradations est la plus lente.

Cette durée sera choisie d'autant plus longue que le taux d'actualisation est faible. L'allonger exagérément introduit une part d'arbitraire dans la définition de l'entretien ultérieur, alors que l'actualisation minimise son poids dans le calcul économique.

En pratique, sur le réseau routier national, pour une durée de calcul de l'investissement initial de 20 ans associée à un risque faible, les comparaisons économiques entre types de structures sont menées sur une durée de 30 ans (40 ans sur autoroutes concédées).

Si l'on souhaite comparer différentes stratégies d'investissement conduisant à un même risque de ruine au bout, par exemple, de 20 au 30 ans, il faudra retenir une période de référence plus longue de l'ordre de 40 à 50 ans (pour un taux d'actualisation de l'ordre de 7%).

3.2. LES DIFFÉRENTES STRATÉGIES INVESTISSEMENT-ENTRETIEN EN RELATION AVEC LE CHOIX DU NIVEAU DE SERVICE

Comme on l'a indiqué en partie I, l'approche probabiliste du dimensionnement conduit à choisir un couple de valeurs *risque-durée initiale de calcul*. Pour expliciter la comparaison de différentes

stratégies d'investissement, il est utile de figer l'un des deux paramètres :

- soit on fixe la durée de calcul et on compare les dimensionnements obtenus pour des risques différents, par exemple comparaison à 20 ans entre 2 et 10 % de risque ;
- soit on fixe le risque de calcul et on compare les dimensionnements obtenus pour différentes durées, par exemple comparaison à 10 ou 20 ans pour 5 % de risque.

Les stratégies peuvent être différenciées en considérant l'importance de l'investissement initial. Des considérations économiques et techniques permettent alors de déduire quelles sont les formes de politique d'entretien à mener en cohérence avec ce choix [12].

On examine successivement les cas :

- d'un **investissement initial élevé** correspondant aux chaussées conçues pour une durée longue (15 à 20 ans, voire plus) avec un risque faible de mise en place de limitations d'usage et d'endommagement structurel,
- d'un **investissement initial faible** correspondant à une durée plus courte et des risques d'interruption de service plus élevés,
- de l'**aménagement progressif**.

Les éléments développés à propos de la construction de chaussées neuves s'appliquent aussi pour l'essentiel aux travaux de réhabilitation.

• *Investissement initial élevé*

Ce choix correspond à l'objectif de disposer de chaussées ne présentant pas de dégradations structurelles avant une longue période. De par les épaisseurs qui résultent d'un tel dimensionnement, la vitesse d'endommagement en fatigue de ces chaussées restera généralement lente, au moins tant que la couche de surface assure convenablement son rôle de protection de la structure. Ces chaussées sont donc **adaptées à une politique de niveau de service élevé** du point de vue de la régularité du service rendu : faible risque d'interruption de trafic lié aux aléas climatiques, et gêne aux usagers occasionnée seulement par le renouvellement périodique de la couche de surface (afin de maintenir le niveau de sécurité et de confort, ainsi que l'intégrité de la structure).

Les études économiques montrent que, tant que le taux d'actualisation n'est pas trop élevé, la politique d'entretien cohérente avec une stratégie où l'on a consenti un investissement initial élevé est un **entretien préventif** [15]. Elle consiste à intervenir dès que les indicateurs d'état traduisent une certaine dégradation du niveau de service, avant que ne se développent des dégradations structurelles. Cette intervention préserve alors le capital de résistance mécanique de la structure.

Les valeurs de risque de calcul retenus à 20 ans, pour les chaussées du réseau routier national, lors de l'actualisation en 1988 du *Catalogue des structures de chaussées neuves* [5], sont récapitulées dans le tableau II.1.

Trafic	T0	T1	T2	T3
Grave-bitume	2 %	5 %	12 %	25 %
Grave hydraulique	2,5 %	5 %	7,5 %	12 %

La diversification du risque selon la technique tient à la différence de comportement en fatigue des matériaux¹.

• *Investissement initial faible*

A l'inverse, les chaussées conçues pour des durées courtes (de l'ordre de 10 à 15 ans) et des risques élevés verront leurs caractéristiques mécaniques évoluer rapidement, même si le niveau de service initial (sécurité, confort) est bon du fait de la qualité de réalisation et des caractéristiques choisies pour la couche de surface. Il va de soi que le risque d'indisponibilité de la route à l'égard des aléas climatiques peut être élevé.

A la limite, on peut imaginer de :

- concevoir un investissement initial conduisant à un seuil limite acceptable pour l'état de la structure de chaussée au bout d'une durée qui soit de l'ordre de la durabilité des caractéristiques de surface de la chaussée ;
- réaliser alors au bout de ce délai un entretien structurel (remise en état) avec rétablissement concomitant des caractéristiques de surface de la chaussée.

La politique d'entretien adaptée à ce type de chaussée est une stratégie d'**intervention curative**. Elle consiste à n'intervenir que lorsque des seuils limites de dégradation de la structure sont atteints. Ce type de stratégie globale est envisageable pour des réseaux secondaires pour lesquels on peut accepter que le confort décroisse sensiblement entre deux opérations de remise en état, et que se produisent des périodes de réduction (voire d'interruption) d'usage de la route.

• *Aménagement progressif*

Entre les deux stratégies extrêmes qui viennent d'être décrites existent des situations intermédiaires comme les stratégies dites d'aménagement progressif. Dans ce cas, l'épaisseur du corps de chaussée est accrue par des rechargements successifs destinés à adopter la structure à l'évolution du trafic et de son agressivité, et selon l'épuisement du capital de résistance en fatigue (fig. II.3.1.).

La stratégie correspondante peut être décrite ainsi :

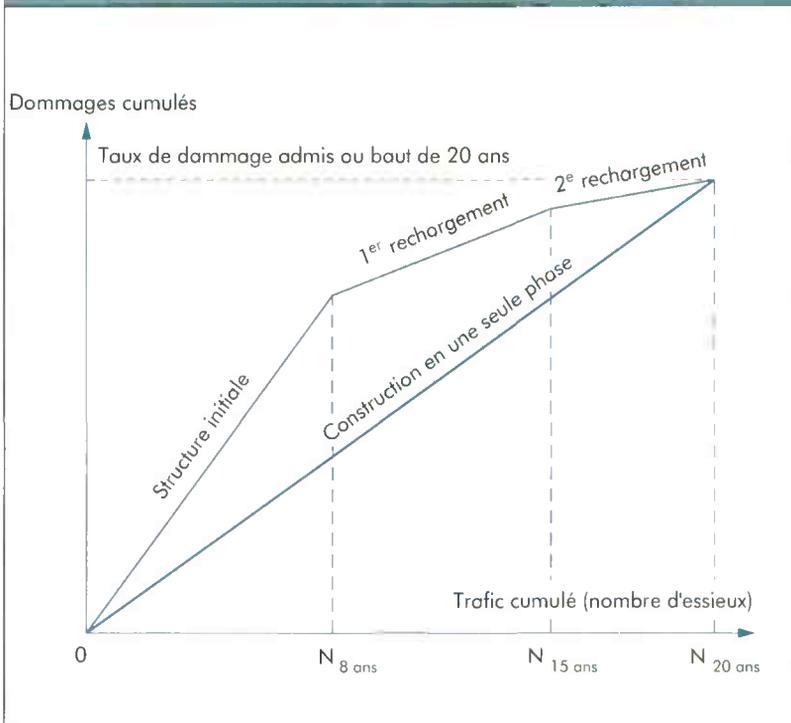
- la structure initiale est conçue pour un risque de calcul modéré, voire faible, comme dans une stratégie à investissement initial élevé, mais pour une durée plus courte (par exemple 5 % au bout de 10 ans au lieu de 20 ans) de sorte qu'elle ne nécessite pas d'entretien structurel général pendant cette période ;
- en fonction du trafic cumulé et des aléas climatiques subis, la chaussée reçoit (par exemple à 8 ans puis à 15 ans) des rechargements successifs de sorte que son endommagement soit ralenti et atteigne (au bout de 20 ans dans l'exemple) celui d'une chaussée conçue pour une stratégie à investissement élevé et entretien préventif.

Le niveau de service que permet cette stratégie peut être assez élevé si les conditions suivantes sont respectées :

- le risque de calcul au bout de la durée de calcul initiale doit en général rester modéré. Bien que les connaissances soient encore insuffisantes dans ce domaine, on peut estimer qu'une valeur

1. Les bases retenues étaient un taux de risque de 5% à 20 ans pour un trafic T1 et de 5 % à 5 ans pour un trafic T4. Les autres valeurs en ont été déduites par interpolation en fonction des caractéristiques en fatigue du matériau.

Figure II.3.1. – Illustration de la stratégie d'aménagement progressif



- de l'ordre de 10 à 15 % pourrait constituer un maximum. Au-delà, des dégradations affectant le confort et la sécurité apparaîtraient probablement avant le terme de la durée initiale ;
- la plate-forme support de chaussée doit être conçue pour assurer dès la première étape une protection suffisante vis-à-vis du gel-dégel. La réduction de l'épaisseur des couches de base et de roulement doit alors être compensée au niveau de la couche de forme ;
 - l'évolution des chaussées doit être régulièrement surveillée afin de réaliser en temps opportun les interventions d'entretien et de rechargement. Le point sensible de la solution d'aménagement progressif est en effet la plus grande vulnérabilité à tout retard dans la mise en place des couches d'entretien, l'accélération des dégradations compromettant alors le gain économique escompté initialement.

3.3. ÉLÉMENTS ÉCONOMIQUES POUR LE CHOIX DE LA STRATÉGIE

L'évaluation et le choix des stratégies pour le réseau des routes nationales en France ont été faits à la fin des années soixante lors de la mise en place de la politique des renforcements coordonnés et de l'entretien préventif. Un des facteurs importants de l'analyse a été la tenue au gel/dégel des chaussées. La stratégie choisie de dimensionnement des chaussées pour une durée longue et un risque faible, avec entretien préventif, n'a pas été remise en cause depuis, pour les autoroutes comme pour les routes nationales [13]. L'objectif de réduction de la gêne aux usagers due aux travaux, mieux prise en compte maintenant, a de plus conforté ce choix.

Les stratégies d'aménagement progressif peuvent s'avérer intéressantes pour des routes à trafic moyen et/ou à forte croissance, dans des régions à climat généralement peu rigoureux (aspect

du comportement au gel/dégel). L'intérêt économique de cette approche croît par ailleurs avec l'élévation du taux d'actualisation. A signaler enfin que des études technico-économiques ont montré que les stratégies d'aménagement progressif s'avèrent globalement plus consommatrices en matériaux et en énergie que la solution de construction en une seule phase. Ce point peut trouver quelque importance dans un contexte de restriction des ressources en granulats et/ou de renchérissement du coût des produits pétroliers. Pour les parties du réseau à faible trafic ou d'intérêt économique secondaire, l'éventail de choix peut être élargi aux stratégies d'investissement initial faible et entretien curatif. Généralement, ce choix ne correspond cependant pas à un optimum économique (sauf cas de très faibles trafics) mais découle de contraintes budgétaires fortes.

3.4. IMPLICATIONS SUR LE CHOIX DES TECHNIQUES DE CHAUSSEE

Après avoir, à l'issue d'études économiques comparatives, défini la stratégie d'investissement et d'entretien permettant d'atteindre les objectifs de niveau de service visés, il reste à choisir la ou les solutions techniques adoptées. Les techniques disponibles ne sont, en effet, pas toutes équivalentes sur le plan de l'évaluation du niveau de service ; la considération de leur mode de fonctionnement fournit déjà une première grille d'analyse.

- Les structures en béton étant sensibles au sous-dimensionnement et ne pouvant être entretenues avec des tapis minces, doivent être construites pour une longue durée.
- Dans le cas des structures à assise traitée aux liants hydrauliques, le risque d'endommagement croît très vite avec une réduction de l'épaisseur de la chaussée. L'épaisseur de la couche d'enrobés qui joue un rôle essentiel d'étanchéité et de protection de la partie supérieure de l'assise ne peut être réduite de façon sensible sans compromettre rapidement la résistance de l'ensemble. Ce type de structure est mal adapté à un aménagement progressif.
- Avec les structures mixtes, une réduction de l'épaisseur de grave-bitume de la structure initiale doit être compensée par un accroissement de celle de la couche de grave traitée aux liants hydrauliques, ce qui amène à un gain faible sur l'épaisseur de la chaussée. La réduction de l'épaisseur de grave-bitume augmentent la vitesse de remontée des fissures doit conduire à une certaine prudence. Ces structures s'accrochent ainsi mal d'une construction progressive. Leurs caractéristiques mécaniques et une évolution structurelle lente – en particulier en matière d'uni – les rendent adaptées aux stratégies d'investissement initial élevé accompagnées d'un entretien préventif.
- Pour les chaussées bitumineuses épaisses et à structure inverse, divers scénarios de construction sont envisageables.
- Les chaussées souples granulaires peuvent présenter un bon niveau initial de confort et de sécurité, mais l'uni tend le plus souvent à se dégrader rapidement, ce qui est peu compatible avec le maintien d'un niveau de service élevé en terme de sécurité et confort. Ceci tend à réserver ces structures à des routes d'intérêt secondaire dans le cadre d'une stratégie d'investissement initial assez faible (durée courte) accompagnée d'un entretien plutôt de type curatif.

En ce qui concerne la couche de surface, la large palette de techniques existantes (cf. partie III) permet de répondre aux différents cas de stratégie et de niveau de service initial envisageables.

4. ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE D'OPTIMISATION POUR LES CHOIX DE DIMENSIONNEMENT

Avec la couche de forme, les chaussées représentent environ 30% du coût d'une route ou d'une autoroute neuve et induisent 50% des dépenses de travaux d'entretien. Cette proportion justifie la recherche d'une optimisation de l'ensemble de ces dépenses : coûts de construction et d'entretien. La recherche d'une solution "optimale" passe par la considération de quatre aspects principaux :

- l'étude d'une possibilité d'intégration de la couche de forme dans la structure de chaussée,
- un choix des techniques de chaussées les plus appropriées au plan technico-économique en cherchant une valorisation des matériaux locaux disponibles,
- un dimensionnement de la structure de chaussée tenant compte de la qualité obtenue sur chantier (compacité, régularité des épaisseurs...) et de l'efficacité des dispositions constructives,
- un chiffrage du coût global construction + entretien.

Cette étude est faite de préférence en préambule à l'avant-projet détaillé chaussées (ou à l'avant-projet autoroutier) parallèlement aux études géotechniques en raison de l'incidence pratique des choix touchant à la couche de forme.

Lorsque la possibilité d'étude est ouverte à l'entreprise dans le cadre d'appels d'offres avec variantes ou concours, la consultation doit être lancée assez tôt pour que la couche de forme puisse être adaptée à la solution technique retenue. Si par ailleurs le jugement des offres prend en considération le coût global construction + entretien, le règlement de la consultation (RC) devra de préférence préciser les scénarios ou demander à l'entreprise d'apporter toute justification.

4.1. ÉTUDE D'UNE POSSIBILITÉ D'INTÉGRATION DE LA COUCHE DE FORME DANS LA STRUCTURE DE CHAUSSÉE

Dans de nombreuses régions, les matériaux naturels susceptibles de constituer en l'état la couche de forme ne sont pas disponibles ou coûteraient trop cher à être transportés. On a donc de plus en plus recours au traitement aux liants hydrauliques des matériaux du tracé.

Pour des chaussées à faible trafic, avec certains matériaux comme des limons, un traitement en place à la chaux et au ciment peut permettre de réaliser l'assise de chaussée. L'amélioration des performances mécaniques, que permet le traitement aux liants hydrauliques, rejoint pour les grands chantiers, comme ceux des autoroutes, la nécessité de s'affranchir au maximum des aléas météorologiques, de supporter un trafic de chantier intense et d'assurer la pérennité de la qualité du support.

La couche de forme traitée, ainsi conçue pour les objectifs de court terme, s'avère en général de qualité et d'épaisseur suffisantes pour inciter à la prendre en compte dans le dimensionnement des chaussées. À partir de la solution minimale définie pour couvrir les objectifs à court terme, on peut alors chercher si une amélioration des caractéristiques à long terme de la couche de forme (traitement en centrale, augmentation du dosage en liant, accroissement d'épaisseur, meilleur réglage) permettrait de réaliser des économies significatives sur les couches de chaussée.

Il convient cependant de ne pas perdre de vue que, s'agissant de matériaux locaux, leur nature et qualité sont par essence dispersées ; cela signifie qu'il faut d'une part procéder à des planches expérimentales, et d'autre part conserver un coefficient de sécurité suffisant pour couvrir les ef-

fets de ces dispersions. On trouvera dans la partie IV des éléments relatifs à la méthodologie d'étude et à la caractérisation mécanique des matériaux de couche de forme.

4.2. CHOIX DES TECHNIQUES DE CHAUSSEE

Les techniques de chaussée utilisées en France résultent d'un compromis nécessaire entre stabilité à court terme, performance à long terme et tenue des caractéristiques de surface. Les qualités que l'an recherche alors pour les matériaux de chaussée sont codifiées dans un ensemble de normes et de directives (cf. partie V).

Les diverses techniques de chaussée, utilisant des matériaux aux propriétés mécaniques très différentes, ne peuvent être strictement équivalentes du point de vue de l'évolution dans le temps du niveau de service. Sous l'angle économique, ce point sera apprécié à travers le chiffrage du coût global construction et entretien (cf. II.4.4.).

La rarefaction et le renchérissement des matériaux nobles, ainsi que les contraintes croissantes venant de la préservation de l'environnement, conduisent de plus en plus à chercher à utiliser, pour les couches d'assise, les matériaux disponibles sur le tracé ou à proximité. Il s'agit souvent de matériaux dont certaines caractéristiques ne répondent pas aux exigences des normes ou directives. Pour s'assurer de leur bon comportement et de leur emploi possible, il faut mettre en œuvre suffisamment en amont un programme d'étude et d'expérimentation pour contrôler certaines performances (stabilité, résistance, gélimité...).

Les résultats de ces études permettent alors de déterminer le domaine d'emploi du matériau (fondation au base, niveau de trafic), les dispositions complémentaires nécessaires (cloutage du béton par exemple) et les précautions à prendre au niveau du chantier (période de réalisation notamment).

4.3. PRISE EN COMPTE DE LA QUALITÉ OBTENUE SUR CHANTIER ET DES DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES DANS LE DIMENSIONNEMENT

La méthode française de dimensionnement tient compte, pour le calcul des contraintes et déformations admissibles des couches de chaussée, de la dispersion sur les épaisseurs des couches (cf. I.4.3.5.).

Les dimensionnements retenus pour les structures du *Catalogue 1977* ou du *Manuel des chaussées à faible trafic* tiennent sur une qualité de réalisation correspondant à ce qui peut être obtenu avec les techniques courantes d'exécution. Une meilleure maîtrise de la qualité de réalisation, à travers notamment une réduction des dispersions d'épaisseur, permet des gains sensibles au plan économique puisque la méthode de dimensionnement en tient compte.

Cette meilleure maîtrise des épaisseurs s'obtient grâce à des ateliers de mise en œuvre et des contrôles adaptés. Cela se traduit en pratique par des tolérances en nivellement plus resserrées et par des contrôles de profil (altimétrie et uni) en commençant dès les couches profondes (couche de forme). Le *Manuel de conception des chaussées d'autoroutes* [6] de Scétauroute tire parti de ces améliorations.

Par ailleurs, l'adaptation de certaines dispositions de drainage peut permettre d'améliorer la portance de la plate-forme support, tandis que certaines dispositions constructives (variation transversale d'épaisseur...) permettent de réduire les volumes de matériaux nécessaires.

4.4. CHIFFRAGE DU COUT GLOBAL CONSTRUCTION + ENTRETIEN

La recherche d'un optimum économique sur le coût actualisé global construction + entretien suppose la définition, pour chaque technique, de scénarios d'entretien. On ne dispose cependant pas encore de méthode permettant de déduire des lois d'évolution des chaussées de la connaissance de la nature et des propriétés mécaniques des matériaux au moment de la construction de la chaussée. Les informations disponibles sur l'évolution des dégradations et le rythme des besoins en entretien procèdent d'une démarche statistique, à partir du bilan de comportement d'un certain nombre de sections de routes et autoroutes.

Pour les chaussées à moyen et fort trafic, un scénario d'entretien type, s'inscrivant dans une logique d'entretien préventif, a été établi en 1989 pour les routes du réseau routier national [14] pour les structures suivantes :

- les chaussées en béton (dalles courtes à joints non goudonnées, dalles courtes à joints goudonnées et dalles épaisses, béton armé continu) (tableau II.2.) ;
- les structures traitées aux liants hydrauliques, les structures mixtes et les structures dites souples aux liants hydrocarbonés (tableau II.3.).

Pour les chaussées autoroutières, le bilan fait à la même époque sur la base de l'analyse du comportement des 9000 km de chaussées alors en service conduit, dans le cadre d'une stratégie de dimensionnement à durée de service longue, de risque faible et d'entretien préventif, aux scénarios sur 40 ans présentés par les tableaux II.4. pour les structures en béton et II.5. pour les structures bitumineuses.

Des choix différents de durée de calcul initiale et de risque ont bien sûr des incidences sur les scénarios d'entretien ; c'est ce que reflètent aussi les différences entre ces deux groupes de tableaux.

Éléments pour la légende commune des tableaux II.2. à II.5.

BAU	bande d'arrêt d'urgence
BB	béton bitumineux
BBTM	béton bitumineux très mince
CF	scellement au pontage de fissures
ES	enduit superficiel
J	réfection des joints transversaux et longitudinaux
JL	réfection des joints longitudinaux
JT	réfection des joints transversaux
RS	réfection de la couche de surface (BBTM, enrobé drainant au recyclage en place)
TPC	terre-plein central
VL	voie lente

Tableau II.2. – Scénarios-types d'entretien pour les structures en béton du réseau RN
Circulaire Direction des routes

Structures	Classes de trafic					
	T0		T1		T2	
Dalles courtes à joints non gaujonnés	(*) 5 ans	BBTM+J	5 ans	J	5 ans	J
			(*) 6 ans	ES		
					(*) 7 ans	ES
	10 ans	J	10 ans	J	10 ans	J
	12 ans	50% BBTM				
	15 ans	J	15 ans	J	15 ans	J
		50% BBTM				
			16 ans	ES		
					17 ans	ES
	19 ans	50% BBTM				
	20 ans	J	20 ans	J	20 ans	J
			23 ans	ES	23 ans	ES
	25 ans	J	25 ans	J	25 ans	J
Dalles courtes à joints gaujonnés et dalles épaisses		50% BBTM				
	30 ans	15 GB + 8 BB ou 20 BAC	30 ans	12 GB + 8 BB ou 18 BAC	30 ans	10 GB + 8 BB ou 16 BAC
	(*) 5 ans	BBTM				
			(*) 6 ans	ES		
	7 ans	J		J	(*) 7 ans	J
	12 ans	50% BBTM				ES
	15 ans	50% BBTM				
	16 ans	J	16 ans	J	16 ans	J
				ES		
					17 ans	ES
	19 ans	50% BBTM				
	23 ans	J	23 ans	J	23 ans	J
				ES		ES
25 ans	BBTM					
30 ans	15 GB + 8 BB ou 20 BAC	30 ans	12 GB + 8 BB ou 18 BAC	30 ans	10 GB + 8 BB ou 16 BAC	
Béton armé continu	(*) 5 ans	BBTM				
			(*) 6 ans	ES		
	7 ans	JL	7 ans	JL	(*) 7 ans	JL ES
	12 ans	50% BBTM				
	16 ans	JL	16 ans	ES JL	16 ans	JL
					17 ans	ES
	23 ans	JL	23 ans	JL ES	23 ans	JL ES
	25 ans	BBTM				
30 ans	15 GB + 8 BB ou 20 BAC	30 ans	12 GB + 8 BB ou 18 BAC	30 ans	10 GB + 8 BB ou 16 BAC	

* Si le traitement initial est un dénudage, l'intervention traitement de surface est retardée de 3 ans.

Tableau II.3 – Scénarios-types d'entretien pour les structures souples, semi-rigides et mixtes du réseau RN. Circulaire Direction des routes

Structures	Classes de trafic					
	T0		T1		T2	
Structures traitées aux liants hydrauliques	3 ans	33% CF	4 ans	33% CF	4 ans	30% CF
	4 ans	33% CF	5 ans	33% CF	5 ans	30% CF
	5 ans	33% CF	6 ans	33% CF		
	8 ans	60% BB 4 cm	8 ans	20% ES	8 ans	20% ES
		40% BB 8 cm		40% BB 4 cm		40% BB 4 cm
				40% BB 8 cm		40% BB 6 cm
	12 ans	50% CF	12 ans	50% CF	12 ans	60% CF
	16 ans	60% BB 4 cm	16 ans	20% ES	16 ans	20% ES
		40% BB 8 cm		40% BB 4 cm		40% BB 4 cm
				40% BB 8 cm		40% BB 6 cm
	24 ans	60% BB 4 cm	24 ans	20% ES	24 ans	20% ES
		40% BB 8 cm		40% BB 4 cm		40% BB 4 cm
				40% BB 8 cm		40% BB 6 cm
	30 ans	45% BB 4 cm	30 ans	15% ES	30 ans	15% ES
	30% BB 8 cm		30% BB 4 cm		30% BB 4 cm	
			30% BB 8 cm		30% BB 8 cm	
Structures mixtes (grave-bitume/ matériau traité aux liants hydrauliques)	5 ans	20% CF	5 ans	20% CF		
	9 ans	60% BB 4 cm	9 ans	20% ES	9 ans	20% ES
		40% BB 8 cm		40% BB 4 cm		40% BB 4 cm
				40% BB 8 cm		40% BB 6 cm
	17 ans	60% BB 4 cm	17 ans	20% ES	17 ans	20% ES
		40% BB 8 cm		40% BB 4 cm		40% BB 4 cm
				40% BB 8 cm		40% BB 6 cm
	25 ans	60% BB 4 cm	25 ans	20% ES	25 ans	20% ES
		40% BB 8 cm		40% BB 4 cm		40% BB 4 cm
				40% BB 8 cm		40% BB 6 cm
30 ans	37% BB 4 cm	30 ans	12% ES	30 ans	12% ES	
	25% BB 8 cm		25% BB 4 cm		25% BB 4 cm	
			25% BB 8 cm		25% BB 8 cm	
Structures souples (grave-bitume/ grave non traitée et grave-bitume/ grave-bitume)	9 ans	60% BB 4 cm	9 ans	20% ES	9 ans	20% ES
		40% BB 8 cm		40% BB 4 cm		40% BB 4 cm
				40% BB 8 cm		40% BB 6 cm
	17 ans	60% BB 4 cm	17 ans	20% ES	17 ans	20% ES
		40% BB 8 cm		40% BB 4 cm		40% BB 4 cm
				40% BB 8 cm		40% BB 6 cm
	25 ans	60% BB 4 cm	25 ans	20% ES	25 ans	20% ES
		40% BB 8 cm		40% BB 4 cm		40% BB 4 cm
				40% BB 8 cm		40% BB 6 cm
	30 ans	37% BB 4 cm	30 ans	12% ES	30 ans	12% ES
	25% BB 8 cm		25% BB 4 cm		25% BB 4 cm	
			25% BB 8 cm		25% BB 8 cm	

Tableau II.4. – Scénarios-types d'entretien pour les structures en béton d'autoroutes
Marnel Scétauroute

Structures	Interventions d'entretien	
Dalle épaisse dénudée	5 ans	JT (BAU et TPC)
	9 ans	BBTM
	17 ans	BBTM
	25 ans	Fraisage + 15 GB sur 60% de VL BBTM
	33 ans	Fraisage + 15 GB sur 40% de VL BBTM
	41 ans	40% RS 60% BB 6 cm
Dalle épaisse + BBTM	5 ans	25% JT (BAU et TPC)
	9 ans	BBTM
	17 ans	Fraisage + BBTM sur VL
	25 ans	Fraisage + 15 GB sur 60% de VL BBTM
	33 ans	Fraisage + 15 GB sur 40% de VL BBTM
	41 ans	40% RS 60% BB 6 cm
Béton armé cinturé dénudé	5 ans	JT (BAU et TPC)
	9 ans	BBTM
	17 ans	BBTM
	25 ans	15 GB + BBTM sur 5 % BBTM sur 95%
	33 ans	15 GB + BBTM sur 95% BBTM sur 5%
	41 ans	40% RS 60% BB 6 cm
Béton armé cinturé + BBTM	5 ans	25% JT (BAU et TPC)
	9 ans	BBTM
	17 ans	Fraisage + BBTM sur VL
	25 ans	15 GB + BBTM sur 5 % BBTM sur 95%
	33 ans	15 GB + BBTM sur 95% BBTM sur 5%
	41 ans	40% RS 60% BB 6 cm

Tableau II.5. – Scénarios-types d'entretien pour les structures bitumineuses et mixtes d'autoroutes. Manuel Scétauroute

Structures	Interventions d'entretien			
Chaussée bitumineuse (grave-bitume/ grave-bitume)	9 ans		BB	6 cm
	17 ans	60%	RS	
		40%	BB	6 cm
	25 ans	40%	RS	
		60%	BB	6 cm
	33 ans	60%	RS	
		40%	BB	6 cm
	41 ans	40%	RS	
		60%	BB	6 cm
Structure mixte (grave bitume/ matériau traité aux liants hydrauliques)	3 ans		CF	
	9 ans		BB	6 cm
	17 ans	60%	RS	
		40%	BB	6 cm
	25 ans	40%	RS	
		60%	BB	6 cm
	33 ans	60%	RS	
	40%	BB	6 cm	
	41 ans	40%	RS	
		60%	BB	6 cm

Appareil d'auscultation multifonction SIRANO





III. LA COUCHE DE SURFACE

1. DÉMARCHE POUR LE CHOIX DE LA COUCHE DE SURFACE

- 1.1. FONCTIONS ET OBJECTIFS À CONSIDÉRER POUR LA COUCHE DE SURFACE
- 1.2. CHOIX DU TYPE DE COUCHE DE SURFACE
- 1.3. SÉLECTION DES PERFORMANCES DES MATÉRIAUX

2. DÉFINITION DE LA COUCHE DE SURFACE ET DIMENSIONNEMENT

Page laissée blanche intentionnellement



LA COUCHE DE SURFACE D'UNE CHAUSSÉE est constituée :

- de la **couche de roulement**, qui est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les actions du trafic et du climat,
- le cas échéant, d'une **couche de liaison**, entre les couches d'assise et la couche de roulement.

Dans certains cas la couche de roulement peut se réduire à un enduit superficiel, ou sa réalisation peut même être différée.

1. DÉMARCHÉ POUR LE CHOIX DE LA COUCHE DE SURFACE

L'application de la méthode de l'analyse de la valeur aux chaussées incite à concevoir les structures en dissociant les fonctions remplies par la couche de surface de celles des couches d'assise.

1.1. FONCTIONS ET OBJECTIFS À CONSIDÉRER POUR LA COUCHE DE SURFACE

La qualité d'usage de la chaussée va dépendre pour une large part de la nature et de l'état de la couche de surface. Cette couche contribue en outre à la pérennité de la structure. L'apport structurel est plutôt secondaire sauf dans le cas de chaussées à assise granulaire dont la couche de surface est la seule couche liée.

Cet ensemble complexe de fonctions fait que le choix de la couche de surface doit provenir de la prise en considération de plusieurs objectifs que l'on peut ranger en quatre groupes :

- la sécurité et le confort des usagers, qui sont en relation avec les caractéristiques de surface de la couche de roulement,
- 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 sels de déverglaçage,
- l'impact sur l'environnement, par la satisfaction des exigences essentielles d'une part, et la recherche en tant que de besoin d'une réduction des bruits de roulement,
- les possibilités de régénération des caractéristiques de surface.



1.1.1. Sécurité et confort des usagers

Les caractéristiques prises en considération, en relation avec ces objectifs, sont : l'uni, l'adhérence, la drainabilité, les caractéristiques photométriques et acoustiques.

• Uni

L'uni est une notion servant à la description des défauts géométriques du profil de la chaussée susceptibles de compromettre la sécurité et le confort de l'utilisateur. On considère en général de façon séparée, l'uni longitudinal et l'uni transversal.

L'uni longitudinal obtenu sur la couche de surface est fonction :

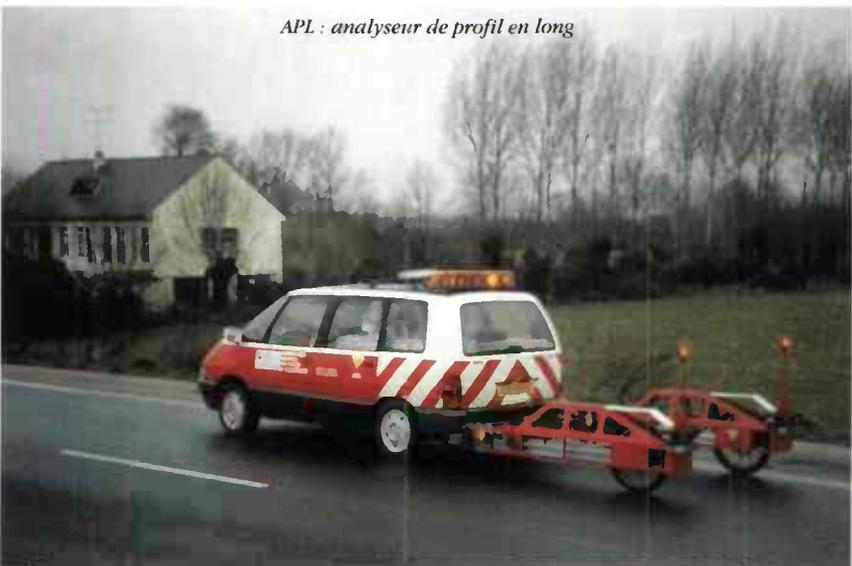
- de l'uni de la couche sur laquelle elle est réalisée,
- de la technique utilisée,
- de la méthode et de la qualité de la mise en œuvre.

De ces deux derniers éléments dépendent les possibilités de rattrapage des défauts d'uni du support. La réalisation d'une couche de liaison bitumineuse (de 5 à 8 cm d'épaisseur), entre les couches d'assise de forte épaisseur et la couche de roulement qui peut être très mince, facilite l'obtention d'un uni longitudinal de qualité.

L'évolution de l'uni longitudinal et de l'uni transversal résulte de la déformation du sol support (voire du corps de chaussée dans certains cas) et de l'orniérage de la couche de surface. La couche de liaison se justifie tout particulièrement dans le cas d'une couche de roulement très mince et dans des zones sensibles à l'orniérage de par la sévérité des sollicitations (rampes, zones de freinage...).

En France, l'uni longitudinal est relevé au moyen de l'analyseur de profil en long, APL (norme NF P 98-218-3 et 4) et est apprécié par un index ou en terme de notes d'uni par gamme de longueurs d'onde. Les déformations transversales peuvent être relevées avec diverses méthodes (NF P 98-219-1, 2 et 3) telles que les transversoprofilomètres à laser ou à ultrason.

APL : analyseur de profil en long



- *Adhérence*

L'adhérence des véhicules dépend de la texture de surface de la couche de roulement. L'adhérence peut être appréciée par des mesures directes de coefficient de frottement par :

- l'essai au pendule SRT correspondant à un frottement à basse vitesse,
- l'essai à la remarque de glissance LPC donnant un coefficient de frottement longitudinal, CFL, à basse, moyenne et haute vitesse (NF P 98-220-2),
- l'essai à l'appareil SCRIM donnant un coefficient de frottement transversal, CFT (NF P 98-220-3).

Dans la circulaire de 1988 de la Direction des routes sur l'Adhérence des chaussées neuves [16], les techniques hydrocarbanées sont classées suivant les résultats de ces mesures en trois catégories :

- apte du point de vue de l'adhérence,
- apte du point de vue de l'adhérence moyennant quelques précautions de mise en œuvre,
- déconseillé en général du point de vue de l'adhérence.

Pour qualifier la texture, qui décrit les irrégularités de la surface, on distingue :

- la **macrotecture** (aspérités de longueur d'onde comprise entre 0,5 et 50 mm), liée à la dimension maximale des granulats et à la composition granulométrique, ainsi qu'à la mise en œuvre. La macrotecture joue sur la capacité d'évacuation de l'eau à l'interface pneumatique-chaussée et sur le développement des forces de frottement à ce contact ;
- la **microtexture** (aspérités de longueur d'onde inférieure à 0,5 mm) liée à la nature pétrographique et au mode d'élaboration des gravillons. La microtexture permet au pneumatique de rompre le film d'eau résiduel jusqu'à l'obtention d'un contact sec ; elle participe aussi à l'augmentation du frottement pneumatique-chaussée.

La macrotecture est mesurée :

- par l'essai à la tache de sable (NF P 98-216-1) dont le résultat est une profondeur moyenne de texture appelée, hauteur au sable vraie, HS_v ;
- avec des appareils optiques sans contact tels que le Minitexturemeter ou le Rugalaser (NF P 98-216-2). Les mesures profilométriques sont analysées en terme de profondeur moyenne de texture ou de moyenne quadratique des écarts d'altitude du profil.

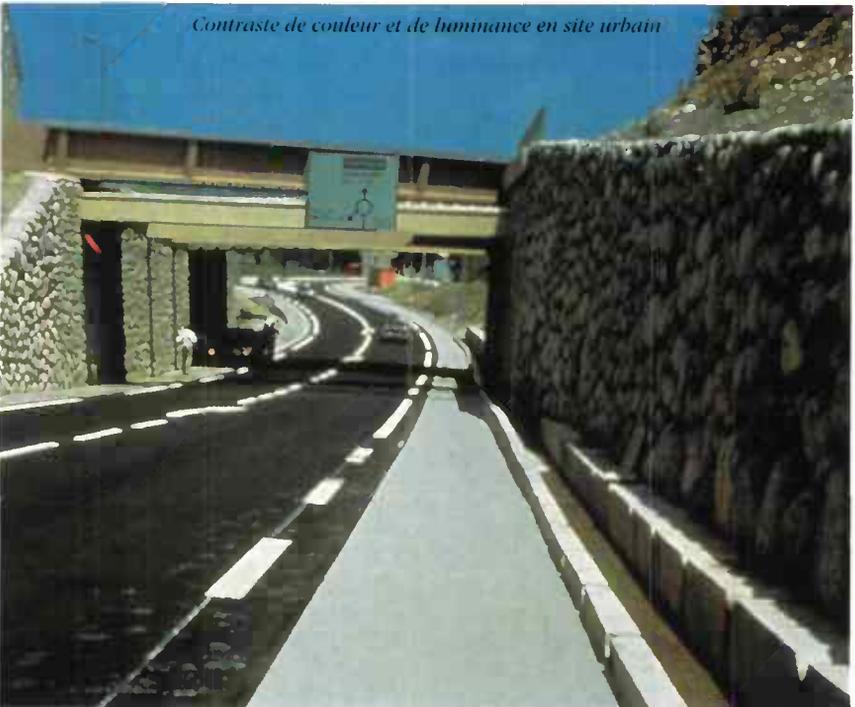
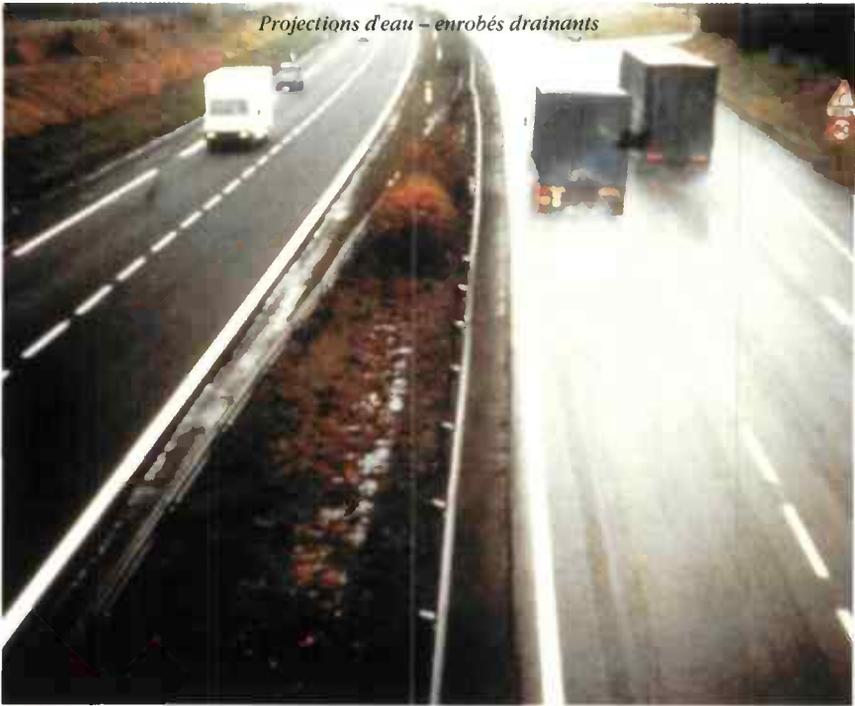
La hauteur au sable vraie est spécifiée dans quelques normes produits :

- pour les BBMa (NF P 98-132) : 0,6 mm ;
- pour les BBTM (NF P 98-137) : 0,8 mm pour les granularités 0/10 et 0/14 et 0,6 mm pour les 0/6 ;
- pour les BBME (NF P 98-141) : 0,4 mm.

La microtexture n'est pas mesurée directement. Elle est caractérisée par l'intermédiaire des valeurs de coefficient de frottement mentionnées plus haut.

- *Drainabilité*

Par sa nature, la couche de roulement peut favoriser l'évacuation des eaux de ruissellement soit superficiellement, soit par drainage à l'intérieur même de la couche de roulement (moyennant l'adoption de dispositions adéquates pour évacuer l'eau à la base de la couche). Cette drainabilité diminue les projections d'eau à l'arrière des véhicules en mouvement, tandis que la capacité de drainage réduit la rétention d'eau par les défauts géométriques de la chaussée.



La capacité d'écoulement superficiel est appréciée au moyen du Drainaroute (NF P 98-217-1), ou indirectement par la mesure de la macrotexture ou par celle du CFL à grande vitesse. Lorsque la couche de roulement est conçue en matériaux drainants, les propriétés hydrauliques sont estimées par :

- la détermination du pourcentage de vides communicants (NF P 98-254-2),
- la vitesse de percolation (NF P 98-254-3) avec l'essai au drainamètre de chantier.

Des spécifications figurent dans la norme NF P 98-134 sur les bétons bitumineux drainants.

• Caractéristiques photométriques

Ces propriétés se rapportent à la perception visuelle de la surface de roulement par l'utilisateur. Il s'agit de la couleur, de la clarté, de la luminance et de la spécularité (capacité d'une surface à réfléchir la lumière).

Il peut être fait des choix de couleur de revêtement pour créer un effet visuel (marquant par exemple l'entrée en agglomération), ou de clarté pour améliorer la perception visuelle (passage en tunnel par exemple).

1.1.2. Maintien de l'intégrité de la structure

Si ce rôle n'est pas assuré par une autre couche, la couche de roulement doit protéger la structure des entrées d'eaux, des sels de déverglaçage et des divers polluants répandus en surface. La fonction d'étanchéité peut être assurée sur toute l'épaisseur de la couche de roulement ou à l'interface avec la couche inférieure. La couche de liaison peut également assurer ou compléter l'étanchéité, lorsque la couche de roulement est drainante ou imparfaitement étanche (certains BBTM par exemple).

Cet objectif d'étanchéité peut être estimé par des mesures de vitesse de percolation d'eau à l'aide d'un perméamètre. En pratique on utilise le plus souvent un critère de pourcentage de vides du mélange exprimé à partir des résultats à l'essai PCG au Duriez, ou de mesures *in situ*.

Pour assurer le maintien dans le temps de cette fonction d'étanchéité, la couche de roulement doit être apte à limiter la remontée des fissures des couches d'assise en matériaux traités aux liants hydrauliques. La couche de liaison permet dans ce cas aussi d'éloigner le sommet de la couche de base de la surface de la chaussée.

La couche de surface doit elle-même conserver son intégrité, ce qui conduit à prendre en considération pour les couches bitumineuses :

- la tenue à l'orniérage (NF P 98-253-1),
- la tenue à l'eau (ou à d'autres fluides) exprimée par le rapport r/R de l'essai Duriez (NF P 98-251-1) pour éviter le phénomène de plumage et la formation de nids de poule.

1.1.3. Impact sur l'environnement

Les matériaux choisis pour la réalisation de la couche de roulement doivent être tels qu'ils ne polluent pas les eaux de ruissellement, et qu'ils ne dégagent ni gaz ni vapeur toxique.

Dans certains cas (notamment pour réduire les apports de matériaux lors des phases d'entretien de la chaussée) les possibilités de recyclage de la couche de roulement sont à considérer.

- *Propriétés acoustiques*

L'essai servant à caractériser les propriétés acoustiques de la couche de surface est la mesure du bruit au passage (S 31-119). La réduction de l'émission de bruit ou contact pneumatique-chaussée et l'absorption des bruits liés au trafic routier sont favorisées par :

- une macrotexture en creux,
- une surface ouverte,
- un matériau poreux.

Ces caractéristiques expliquent les propriétés acoustiques favorables des enrobés et des bétons de ciment drainants, par rapport aux procédés traditionnels.



1.1.4. Possibilités d'entretien

Les caractéristiques fonctionnelles de la couche de surface diminuent dans le temps: réduction de l'adhérence par diminution de la texture, réduction de la drainabilité par calmatage, perte de l'imperméabilité par le développement des fissures. Le choix de la nature de la couche de roulement doit donc être fait en cohérence avec la stratégie d'entretien définie par l'exploitant de la route.

Certains procédés de restauration des caractéristiques de surface peuvent être envisagés comme une alternative à la mise en œuvre d'une nouvelle couche de roulement :

- la projection d'eau sous très haute pression, ou de particules métalliques (grenailage) sur chaussée béton et sur chaussée bitumineuse, pour augmenter la texture de la couche de roulement,
- le striage et le rainurage du béton,
- le décalmatage des bétons bitumineux drainants,
- la réfection des défauts localisés,
- le pontage des fissures de retrait,
- l'application d'enduits superficiels pour améliorer l'étanchéité ou restaurer l'adhérence du revêtement,
- le fraisage des enrobés pour supprimer les traces d'arrières et redonner une texture (éphémère) à la couche de roulement,
- le thermoreprofilage pour reprendre les irrégularités géométriques,
- etc.

1.2. CHOIX DU TYPE DE COUCHE DE SURFACE

Les objectifs retenus et les performances recherchées permettent d'opérer un premier choix parmi les familles de techniques pour couche de roulement (tableau III.1.) et de préciser un domaine d'épaisseur. Les données économiques du projet (coût et durée de service visée entre deux entretiens notamment) doivent entrer en ligne de compte.

Une couche de liaison est ensuite à étudier dans un certain nombre de situations :

- selon la nature de la couche de roulement, dans le cas des trafics forts et pour les couches de roulement d'épaisseur inférieure à 5 cm,
- si l'exigence sur le niveau d'uni est élevée, en examinant aussi la résistance à l'arrièrage,
- selon la nature des couches sous-jacentes. Ainsi sur une structure semi-rigide, la couche de liaison est indispensable lorsque la couche de roulement est mince ou très mince, et dans le cas de forts trafics.

1.3. SÉLECTION DES PERFORMANCES DES MATÉRIAUX

La qualité des granulats (caractéristiques intrinsèques et angularité) est choisie en fonction du trafic.

Le trafic, les conditions climatiques et d'exécution des travaux, ainsi que la durée de maintien du niveau de service fixé permettent de choisir la nature du liant et l'incorporation éventuelle d'additifs.

Le choix s'opère actuellement de manière empirique, mais devrait se faire en connaissant les lois d'évolution de l'arrièrage et de la texture de la formule, en fonction des sollicitations et du temps de remontée des fissures.

La couche de liaison est fréquemment un béton bitumineux à module élevé (NF P 98-141) sinon un béton bitumineux semi-grenu (NF P 98-130).



Enduits superficiels ESU



Enrobés coulés à froid ECF (0/6)



Sable enrobé clouté



BBTM (0/10)



BB drainant (0/10)



BBSG (0/14)

Objectifs	Caractéristiques	Enduits superficiels ESU	Enduits épais	Enrobés coulés à froid ECF	BBUM	Sable enrobé clouté	BBTM	Asphalte clouté	BBC 0/6	BB drainant	BBM	BBC 0/10	BBSG	BBME	Béton de ciment		
															Strié	Dénudé	Clouté
Sécurité	Normes NF P	98-160					98-137	98-145	98-133	98-134	98-132	98-133	98-130	98-141	98-170		
	Épaisseur (cm)			<1,5	<2	<2	2 à 3	2 à 4	3	3 à 4	3 à 5	5 à 7	5 à 9				
	Adhérence initiale	++	++	0 à +	+	+	+	+	+	+(1)	+	+	0	0	0	+	+
	Adhérence à 5 ans	0 à +	+	0 à -	?	-	+	-	0	+	0	0	0 à -	0	-	0 à +	0
	Drainabilité surface	+	+	-	0 à -	0 à -	0	-	0 à -	0	++	0	-	-	0	0 à +	0
Confort	Amélioration de l'uni	-	--	--	-	-	0	-	0	+	+	+	+	(2)+	(2)+	(2)+	
	Silence	- à --	--	0	0 à +	-	+	-	-	++	0 à +	-	0 à +	0 à +	--	- à 0	--
	Photométrie	++	++							++		-	-	+	+	+	
Passibilité d'apport structurel	Imperméabilité de surface	+	++	-	+	0 à +	+	++	+	(3)	+	+	++	++	(4)	(4)	(4)
	Anti-remontée de fissures	-	0	--	-	-	-	-	-	0	0	+	+	+			
	Orniérage	(5)	(5)		+	-	+	0	0	++	0	0	0	++	++	++	++

Tableau III.1. *Éléments indicatifs pour le choix de la couche de roulement*

Légende

- ++ Très bon
- + Bon
- 0 Moyen
- Médiocre
- Mauvais

(1) L'adhérence à faible vitesse des enrobés drainants à leur mise en service est en général moyenne car elle est perturbée par la présence d'un film de liant à la surface des granulats. Après décapage par le trafic, l'adhé-

rence à faible vitesse s'améliore. A vitesse élevée, les valeurs de CFL sont bonnes.

(2) L'uni des chaussées en béton est relativement indépendant de l'uni de la couche support. L'amélioration d'uni

provient de la qualité de mise en œuvre de la couche.

(3) Par définition, les enrobés drainants ne sont pas imperméables. Si le corps de chaussée doit être protégé, il y a lieu de mettre en œuvre

un dispositif assurant cette fonction avant répodage de l'enrobé drainant.

(4) Des fissures d'importance variable selon les techniques apparaissent en surface des chaussées en béton de ciment.

Elles peuvent remettre en cause l'imperméabilité de surface.

(5) Pour ces techniques, il ne s'agit pas véritablement d'orniérage, mais plutôt d'un phénomène de lissage et de poinçonnement du support.

2. DÉFINITION DE LA COUCHE DE SURFACE ET DIMENSIONNEMENT

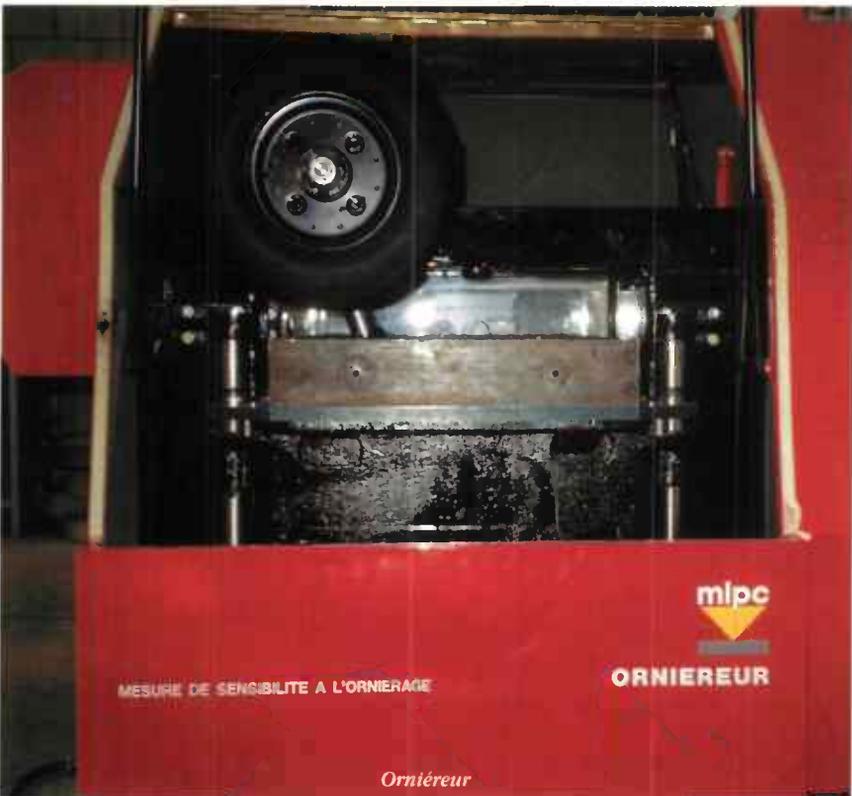
Ce paragraphe se rapporte aux seules couches de surface en matériaux bitumineux (il n'aborde pas par exemple les traitements de surface des chaussées en béton qui sont sans incidence sur le dimensionnement de la structure).

Les phénomènes de vieillissement pouvant conduire à des cas de fissuration thermique ou de désenrobage sont pris en considération dans la sélection des propriétés des liants et de leur dosage (cf. III. 1.3). Ils ne font pas l'objet de vérification par le calcul.

Le comportement de la couche de surface est à examiner sous l'angle de sa résistance :

- à l'ornièrage par fluage,
- à la fissuration (remontée des fissures des couches d'assise, et fissuration propre par fatigue dans certains cas).

Le problème de l'ornièrage par fluage est abordé en pratique de manière empirique au stade de l'étude de formulation, par le biais d'essais à l'ornièreur (NF P 98-253-1). Des spécifications portant sur le pourcentage d'ornièrage admissible (pour l'essai à l'ornièreur à 60 °C) figurent dans les normes produits des divers matériaux bitumineux. L'emploi de modèles mathématiques de prévision de la profondeur d'ornièrage à partir de résultats d'essais rhéologiques particuliers est encore peu développé.



Dans le cas d'une couche de surface réalisée sur un support fissuré (renforcement d'une structure dégradée) ou amenée à se fissurer (cas des assises traitées aux liants hydrauliques), il n'est pas effectué, dans la pratique, de calcul de temps de propagation de fissure. L'efficacité des couches d'interposition visant à empêcher la remontée de la fissuration à travers la couche de surface est appréciée empiriquement par un essai de traction-flexion cyclique (NF P 98-259-1) calé sur l'observation du compartement de sections tests.

Ainsi actuellement, l'épaisseur de la couche de surface résulte, non de calculs, mais essentiellement d'exigences technologiques de mise en œuvre propres à chaque solution et de considérations empiriques vis-à-vis de la remontée de la fissuration.

Sous l'action du trafic, la couche de roulement est soumise par les pneumatiques à un état de contrainte complexe. Le compartement mécanique de la couche de roulement n'est cependant étudié que vis-à-vis des contraintes normales qui s'exercent en surface.

Pour la détermination de l'épaisseur de la couche de surface en enrobés bitumineux, on considère ici trois situations :

- les chaussées souples à couche de base granulaire et dont la couche de roulement est peu épaisse (moins de 6 cm) ;
- les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques ;
- les autres cas de chaussées.

Dans le premier cas correspondant à des couches liées minces, la méthode rationnelle de calcul exposée dans la partie VI, de par ses simplifications, ne permet pas seule de déterminer l'épaisseur de couche de roulement à retenir. Les méthodes empiriques qui servent de calage sont alors à employer ; la figure III.2.1. propose une épaisseur en fonction du trafic cumulé équivalent.

Pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, la couche de surface en matériaux bitumineux assure une protection mécanique et thermique. C'est ici aussi l'expérience tirée de l'observation du compartement de ces chaussées qui donne une référence pour le choix d'une valeur d'épaisseur minimale afin de prévenir des décallements de la couche de roulement.

Ainsi, selon le trafic, il semble souhaitable de retenir les valeurs suivantes :

- 6 cm pour les trafics T2 et inférieurs,
- 8 cm en T1,
- de 10 à 14 cm à partir de T0, selon la nature des matériaux de la couche de base et les conditions de réalisation.

Dans les autres cas, l'épaisseur de la couche de surface (couche de roulement et couche de liaison) est déterminée en fonction des limites technologiques de chaque technique et de l'épaisseur totale de la structure de chaussée telle que déduite des calculs de dimensionnement exposés en partie VI.

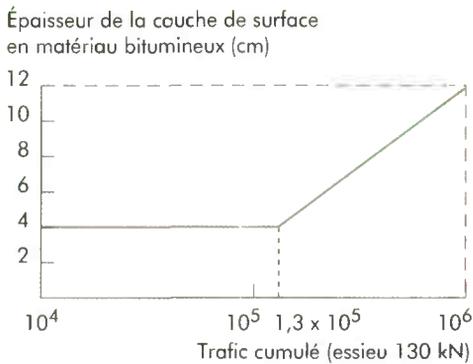
En ce qui concerne la couche de liaison, son épaisseur peut aller de 5 cm pour une granulométrie 0/10, à 8 cm en 0/14. Les épaisseurs de l'ordre de 5 à 7 cm sont actuellement les plus favorables du point de vue des résultats d'uni. Des valeurs plus fortes peuvent être retenues vis-à-vis de la résistance à l'ornièrage si la couche de roulement est mince au très mince.

Pour simplifier les calculs, la couche de surface est parfois assimilée à une certaine épaisseur de matériau de couche de base, par le biais d'une relation d'équivalence. A l'épaisseur h_1 de couche de surface ayant un module E_1 est substituée une épaisseur h' de matériau de couche de base en matériaux liés, de module E_2 telle que :

$$h' = h_1 (E_1/E_2)^{0,5}.$$

Avec les bétons bitumineux drainants, BBDr, à défaut d'autres résultats, on assimile une épaisseur h de couche de surface en BBDr, à une épaisseur $h/2$ de béton bitumineux semi-grenu.

Figure III.2.1 – Epaisseur de la couche de surface en matériau bitumineux pour les chaussées à faible trafic, à assise granulaire





IV. LA PLATE-FORME SUPPORT DE CHAUSSÉE

1. LE CONTEXTE FRANÇAIS

2. FONCTIONS ET CRITERES DE CLASSEMENT DES PLATES-FORMES

3. CARACTÉRISATION DE LA PARTIE SUPÉRIEURE DES TERRASSEMENTS

- 3.1. IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX ET CONDITIONS D'EMPLOI
- 3.2. ENVIRONNEMENT HYDRIQUE
- 3.3. LES CAS DE PARTIE SUPÉRIEURE DES TERRASSEMENTS
- 3.4. CLASSES DE PORTANCE DE L'ARASE DE TERRASSEMENT
- 3.5. CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS EN VUE DU DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES

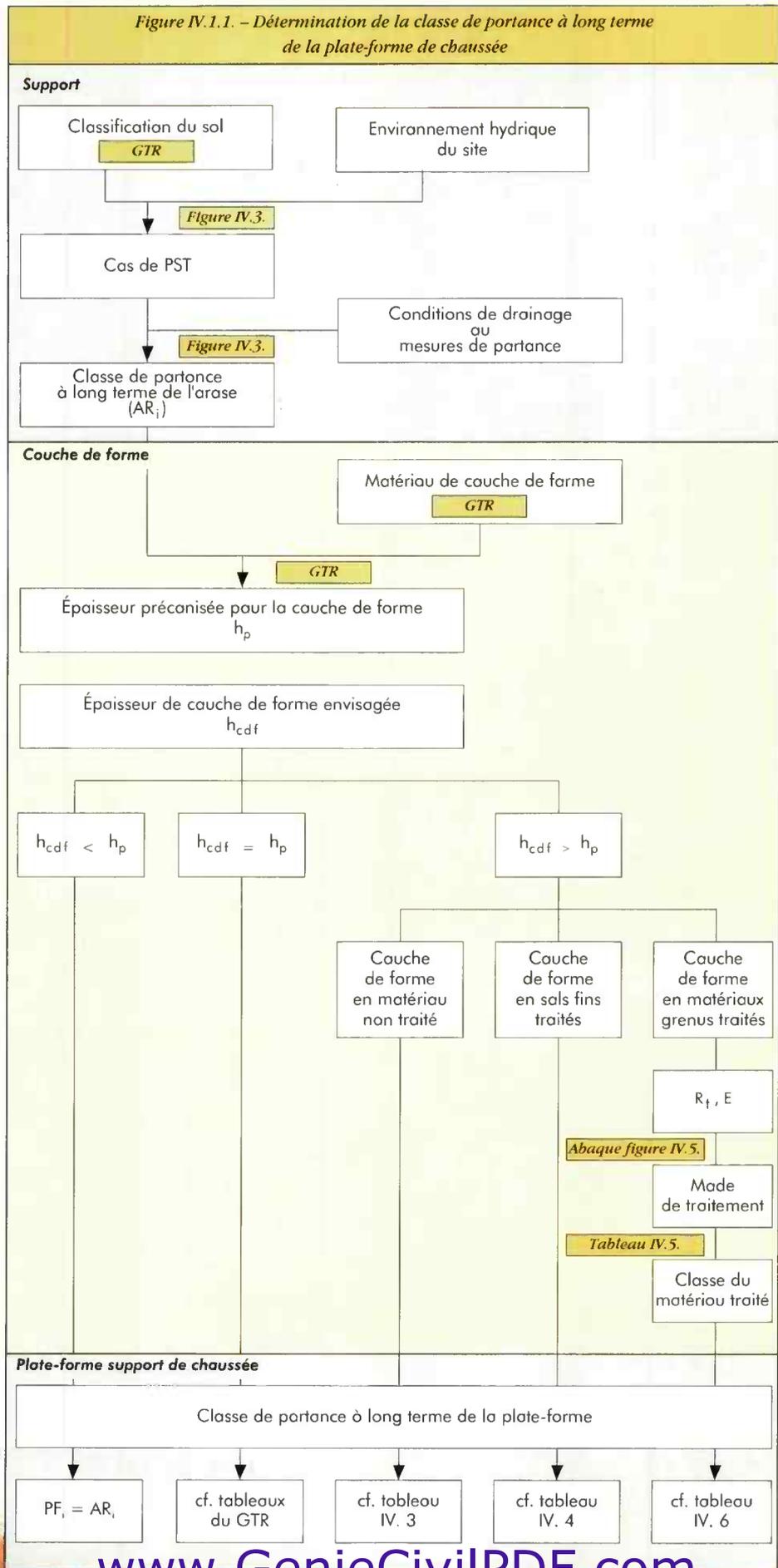
4. COUCHE DE FORME

- 4.1. ROLES ET CONCEPTION DE LA COUCHE DE FORME
- 4.2. LES MATÉRIAUX DE COUCHE DE FORME

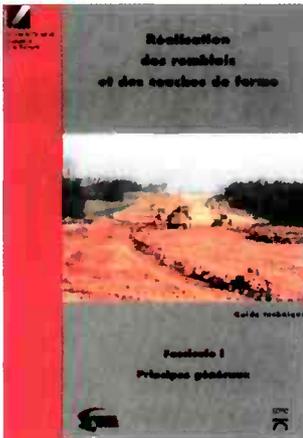
5. CLASSEMENT DES PLATES-FORMES SUPPORT POUR LE DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSÉE

- 5.1. CLASSES DE PORTANCE À LONG TERME DES PLATES-FORMES SUPPORT DE CHAUSSÉE
- 5.2. REGLES DE SURCLASSEMENT DE PORTANCE DES PLATES-FORMES
- 5.3. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX DE COUCHE DE FORME POUR UNE ÉTUDE DE DIMENSIONNEMENT GLOBALE CHAUSSÉE/COUCHE DE FORME
- 5.4. JUSTIFICATION DU DIMENSIONNEMENT DES COUCHES DE FORME EN MATÉRIAUX TRAITÉS DANS UNE ÉTUDE GLOBALE CHAUSSÉE/COUCHE DE FORME

Figure IV.1.1. – Détermination de la classe de portance à long terme de la plate-forme de chaussée



1. LE CONTEXTE FRANÇAIS



L'approche retenue en France pour la définition et le suivi des travaux de terrassement procède d'une démarche originale codifiée pour une large part, depuis 1976, dans un document de la Direction des routes intitulé *Recommandation pour les terrassements routiers (RTR 76)*. Après quinze années d'expérience, ce document a été révisé et republié en 1992 sous la forme d'un guide technique LCPC-SETRA *Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR)* [19].

La démarche de ce guide s'articule ainsi :

- une classification des sols et matériaux racheux adaptée aux problèmes de terrassement qui regroupe en classes les matériaux susceptibles des mêmes conditions d'utilisation,
- une définition des conditions d'utilisation des matériaux en remblai,
- une définition des conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme,
- et l'énoncé des règles de compactage pour les emplacements en remblai et couche de forme.

On note en France un usage croissant des méthodes de traitement en place des sols à la chaux et aux liants hydrauliques. Ces techniques permettent à la fois d'accroître les cadences d'exécution, de réduire l'incidence des aléas climatiques pendant la phase de travaux de terrassement, et de valoriser les matériaux locaux.

La couche de forme ayant un rôle en phase de construction de la chaussée mais aussi vis-à-vis du fonctionnement mécanique de l'ensemble de la chaussée, la question de la conception et du dimensionnement de la couche de forme intéresse à la fois le géotechnicien et le projeteur de la structure de chaussée.

Le GTR propose une démarche pour la conception et le dimensionnement de la couche de forme qui conduit à une définition de la portance à long terme de la plate-forme support de chaussée. Cette démarche présentée de façon synthétique par un tableau synoptique (fig. IV.1.1.) est explicitée dans la suite du présent document. Ce dernier complète également le GTR en précisant les hypothèses, modèles et données nécessaires à la description des sols support et des couches de forme pour le dimensionnement des structures de chaussées en liaison avec la partie VI.

2. FONCTIONS ET CRITERES DE CLASSEMENT DES PLATES-FORMES

Les structures de chaussée sont construites sur un ensemble appelé **plate-forme support de chaussée** (fig. IV.2.1.), constitué :

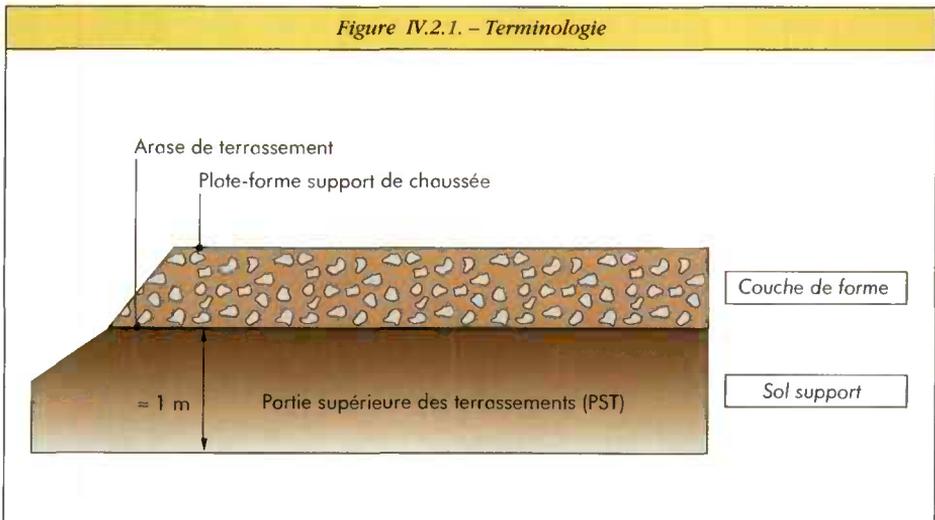
- du sol support (déblai ou remblai, sol en place ou ropporté) désigné dans sa zone supérieure (sur 1 m d'épaisseur environ), par le terme **partie supérieure des terrassements (PST)**, et dont la surface constitue l'**arase de terrassement** ;
- d'une couche de forme éventuelle.

Cette plate-forme remplit deux fonctions essentielles :

- elle doit d'abord protéger le sol support des intempéries et supporter le trafic de chantier pour permettre la construction des couches de chaussée ;
- elle constitue ensuite le support de la chaussée et influe à ce titre sur les sollicitations mécaniques des couches de chaussée et, par là, sur leur dimensionnement.

Ainsi, le classement et les exigences auxquelles doit répondre la plate-forme support de chaussée sont définis en prenant en considération :

- des critères à court terme associés à la construction de la chaussée,
- une caractérisation à long terme pour le dimensionnement et la vérification du comportement de la chaussée en service.



A court terme, lors du chantier, la plate-forme doit présenter des caractéristiques minimales :

- de traficabilité, pour assurer, pendant la saison prévue pour l'exécution des travaux de chaussée, la circulation des engins approvisionnant les matériaux de l'assise,
- de nivellement pour garantir la régularité de l'épaisseur des couches et l'uni de la chaussée terminée,
- de déformabilité pour permettre le compactage correct des couches de chaussée,
- de résistance vis-à-vis du gel si nécessaire.

S'agissant de critères pour la construction, les valeurs seuils dépendent de l'importance du chantier, du matériel, des méthodes et conditions d'exécution, ainsi que de la nature du matériau de la couche de fondation de la chaussée.

Pour les chantiers courants, les valeurs généralement retenues sont :

- pour la traficabilité, dans le cas de sols sans cohésion non traités, un indice portant immédiat, IPI, (norme P 94-078) au moins égal à 35,
- un nivellement de la plate-forme effectué avec une tolérance de ± 3 cm par rapport à la ligne rouge des terrassements,
- une déformabilité de la plate-forme, au moment de la mise en œuvre des couches de chaussée, telle que :
 - le module EV_2 déterminé à la plaque, ou le module équivalent à la Dynaplaque, soit supérieur à 50 MPa, ou,
 - la déflexion relevée sous essieu de 130 kN soit inférieure à 2 mm.

Lors de petits chantiers, pour la réalisation de chaussées à faible trafic, il peut être envisagé de mettre en œuvre l'assise de chaussée avec des exigences de traficabilité et une portance à court terme de la plate-forme un peu plus faibles, à partir de 30 MPa environ, si la couche de fondation est en grave non traitée ou faite avec certains matériaux traités aux liants hydrauliques et à la chaux comme les sables ou les limons.

A l'inverse, pour des chantiers, comme ceux d'autoroutes, où la circulation sur la couche de ferme sera importante, et afin de réduire la dispersion sur l'épaisseur des couches de chaussée (mayennant certaines dispositions de mise en œuvre comme le reprofilage à l'autograde de l'arasement de terrassement...), les seuils précédents peuvent être relevés :

- un nivellement de la plate-forme effectué avec une tolérance de ± 2 cm,
 - un module EV_2 d'au moins 80 MPa,
 - une déflexion inférieure à 1,5 mm,
- valeurs qui sont préconisées dans le *Manuel de conception des chaussées d'autoroutes de Scétouraute* [6].

A long terme, vis-à-vis de la justification du dimensionnement de la structure de chaussée, la plate-forme support est caractérisée par une classe de portance qui résulte :

- du compartement du sol support, sur l'épaisseur de la partie supérieure des terrassements (PST), tel qu'il peut être apprécié à partir de sa nature et de l'environnement hydrique pour les conditions les plus défavorables (périodes de gel et dégel exclues),
- de la nature des matériaux et de l'épaisseur de la couche de ferme retenues.

3. CARACTÉRISATION DE LA PARTIE SUPÉRIEURE DES TERRASSEMENTS

Le dimensionnement de la couche de forme et de la structure de chaussée part d'une caractérisation mécanique des sols constituant la PST.

3.1. IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX ET CONDITIONS D'EMPLOI

L'identification des matériaux est faite par référence à la norme de classification des sables, matériaux rocheux et sous-produits industriels (NF P 11-300) fondée sur :

- des paramètres descriptifs de la granularité et de l'argilosité ;
- l'état hydrique à la mise en œuvre,
- des paramètres de comportement, tirés d'essais mécaniques, pour apprécier la possibilité d'emploi des sables et matériaux rocheux en couche de forme.

Les tableaux synoptiques de classification sont reproduits dans l'annexe A.4. A partir de cette classification et de la situation météorologique au moment des travaux, le GTR précise les conditions d'emploi (en l'état ou moyennant traitement), ainsi que les modalités de mise en œuvre à respecter.

3.2. ENVIRONNEMENT HYDRIQUE

L'état hydrique des sols supports, et par là même les caractéristiques mécaniques des matériaux sensibles à l'eau, fluctuent dans le temps, selon les conditions hydrologiques (nappe, infiltrations d'eau), et en fonction des dispositions constructives du projet (tracé, géométrie, dispositifs de drainage et d'assainissement).



Cette variabilité dans le temps et dans l'espace rend difficile une description précise de l'environnement hydrique. C'est pourquoi, pour la définition des cas de PST servant à l'estimation de la portance à long terme de la plate-forme, les éléments pris en compte se réduisent à :

- la catégorie d'état hydrique des matériaux de la PST (très sec : ts, sec : s, moyen : m, humide : h au très humide : th) telle que définie par la classification géotechnique,
- une appréciation du contexte général la chaussée une fois en service (possibilités d'alimentation en eau, drainage...).

3.3. LES CAS DE PARTIE SUPÉRIEURE DES TERRASSEMENTS (PST)

A partir des éléments précédents (nature et état des matériaux au moment de la mise en œuvre, et environnement hydrique), sept cas de PST sont définis, ainsi que les décrit le tableau de la figure IV.3.1.

3.4. CLASSES DE PORTANCE DE L'ARASE DE TERRASSEMENT

La description de la PST (fig. IV. 3.1.) est complétée par la portance à long terme sur l'arase de terrassement, pour laquelle on distingue quatre classes (tableau IV.1.). Dans le cas de PST n° 0 (classe d'arase ARO) il est nécessaire d'améliorer d'abord la situation (par purge, drainage, etc.) pour se ramener à un cas de portance à long terme supérieure à 20 MPa avant d'établir la plate-forme support de chaussée.

Tableau IV.1. – Classes de portance à long terme au niveau de l'arase de la PST

Module (MPa)	20	50	120	200
Classe de l'arase	AR1	AR2	AR3	AR4

Pour les chantiers autaraufiers, Scétaurante a intraduit une classe d'arase intermédiaire notée AR12, correspondant à une portance comprise entre 35 et 50 MPa. Cette situation est retenue :

- en PST n° 3, lorsque le drainage est considéré comme efficace,
- en PST n° 4, lorsque le traitement des sals est fait uniquement à la chaux.

La classe de portance, proposée par le GTR selon le cas de PST, ne peut être confirmée à partir d'essais de chargement à la plaque, à la Dynaplaque, ou de la mesure de la déflexion sous l'essieu de 130 kN¹, que si les sals sont insensibles à l'eau, ou que l'état hydrique au moment de l'essai est représentatif des conditions hydriques défavorables qui peuvent être rencontrées la chaussée une fois en service. Dans le cas de sals fins, le module peut être estimé à partir d'essais de poinçonnement de type CBR sur des échantillons préparés à une teneur en eau représentative des conditions hydriques défavorables à long terme, si l'on dispose de corrélations appropriées.

1. Si la PST est assimilée à un demi-espace élastique et homogène, pour une valeur de coefficient de Poisson égale à 0,35, la déflexion sous l'essieu de 130 kN à roues jumelées, w , et le module d'Young, E , sont reliés par la relation $E.w = 10\ 340$, avec E en MPa et w en mm/100.

Figure IV.3.1. – Cas de PST

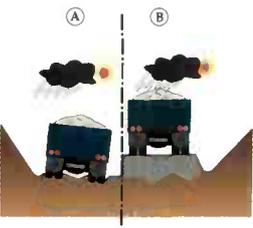
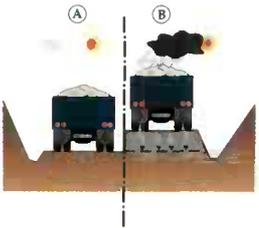
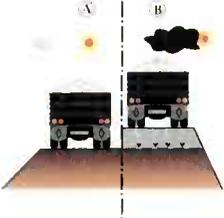
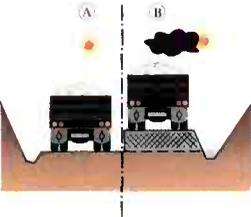
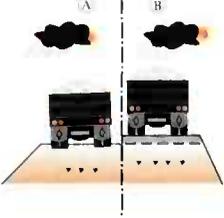
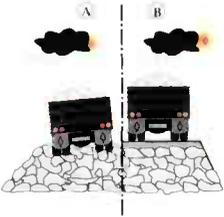
Cas de PST	Schéma	Description	Classe de l'arase	Commentaires
PST n°0		<p>Sols A, B2, B4, B5, B6, C1 se trouvant dans un état hydrique (th).</p> <p>Contexte Zones tourbeuses, marécageuses au inondables. PST dont la portance risque d'être quasi nulle au moment de la réalisation de la chaussée ou au cours de la vie de l'ouvrage.</p>	ARO	La solution de franchissement de ces zones doit être recherchée par une opération de terrassement (purge, substitution) et/ou de drainage (fossés profonds, rabattement de la nappe...) de manière à pouvoir reclasser le nouveau support obtenu au mains en classe AR1.
PST n°1		<p>Sols Matériaux des classes A, B2, B4, B5, B6, C1, R12, R13, R34 et certains matériaux C2, R43 et R63 dans un état hydrique (h).</p> <p>Contexte PST en matériaux sensibles de mauvaise portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) et sans possibilité d'amélioration à long terme (B).</p>	AR1	<p>Dans ce cas de PST, il convient :</p> <ul style="list-style-type: none"> – soit de procéder à une amélioration du matériau jusqu'à 0,5 mètre d'épaisseur par un traitement principalement à la chaux vive et selon une technique "remblai". On est ramené au cas de PST 2, 3 ou 4 selon le contexte. – soit d'exécuter une couche de forme en matériau granulaire insensible à l'eau.
PST n°2		<p>Sols Matériaux des classes A, B2, B4, B5, B6, C1, R12, R13, R34 et certains matériaux C2, R43, et R63 dans un état hydrique (m).</p> <p>Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A). Cette portance peut cependant chuter à long terme sous l'action des infiltrations des eaux pluviales et d'une remontée de la nappe (B).</p>	AR1	Si l'on peut réaliser un rabattement de la nappe à une profondeur suffisante, on est ramené au cas de PST 3. Bien que les exigences requises à court terme pour la plate-forme support puissent être momentanément obtenues au niveau de l'arase, il est cependant quasiment toujours nécessaire de prévoir la réalisation d'une couche de forme.

Figure IV.3.1. – Cas de PST (suite)

PST n°3		<p>Sols Mêmes matériaux que dans le cas de PST 2.</p> <p>Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau, de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A), mais pouvant chuter à long terme sous l'action de l'infiltration des eaux pluviales (B).</p>	AR1	Mêmes commentaires qu'en PST 2 sur la nécessité de réalisation d'une couche de forme. Sans mesure de drainage.
PST n°4		<p>Sols Mêmes matériaux qu'en PST 1 sous réserve que la granularité permette leur traitement.</p> <p>Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau (en remblai ou rattachés en fan de déblai hors nappe) ayant subi une amélioration à la chaux ou aux liants hydrauliques selon une technique "remblai" et sur une épaisseur de 0,30 à 0,50 mètre. L'action du traitement est cependant durable.</p>	AR2	<p>Classement en AR2 si des dispositions constructives de drainage à la base de la chaussée permettent d'évacuer les eaux et d'éviter leur infiltration.</p> <p>La portance de l'arase peut-être localement élevée mais la dispersion n'autorise pas un classement supérieur.</p> <p>La décision de réalisation d'une couche de forme sur cette PST dépend du projet et des valeurs de portance de l'arase mesurées à court terme (après prise du liant).</p>
PST n°5		<p>Sols B1 et D1 et certains matériaux rocheux de la classe R43.</p> <p>Contexte PST en matériaux sableux fins insensibles à l'eau, hors nappe, posant des problèmes de traficabilité.</p>	AR2	<p>La portance de l'arase de cette PST dépend beaucoup de la nature des matériaux. Classement en AR3 si le module EV_2 de l'arase est supérieur à 120 MPa.</p> <p>Les valeurs de portance à long terme peuvent être assimilées aux valeurs mesurées à court terme. La nécessité d'une couche de forme sur cette PST ne s'impose que pour satisfaire les exigences de traficabilité.</p>
PST n°6		<p>Sols Matériaux des classes D3, R11, R21, R22, R32, R33, R41, R42, R62 ainsi que certains matériaux C2, R23, R43 et R63.</p> <p>Contexte PST en matériaux graveleux ou rocheux insensibles à l'eau mais posant des problèmes de réglage et/ou de traficabilité.</p>	AR2 AR3 AR4	<p>Classement en AR3 si $EV_2 \geq 120$ MPa, en AR4 si $EV_2 \geq 200$ MPa.</p> <p>Les valeurs de portance à long terme peuvent être assimilées aux valeurs mesurées à court terme.</p> <p>La nécessité d'une couche de forme ne s'impose que pour les exigences à court terme (nivellement et traficabilité) et peut donc se réduire à une couche de fin réglage.</p>

3.5. CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS EN VUE DU DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES

Les sols sont des matériaux dont la rhéologie complexe est marquée par la dépendance des caractéristiques mécaniques avec le niveau de sollicitation (non-linéarité) et l'état hydrique. A cette complexité de comportement s'ajoute la grande variabilité possible, le long du tracé, de ces matériaux non élaborés.

Cependant pour l'évaluation des sollicitations dans les couches d'assise, il s'avèrera souvent suffisant d'avoir une description approchée du compartement mécanique du sol support.

La méthode de dimensionnement est calée en retenant les caractéristiques mécaniques correspondant aux conditions hydriques les plus défavorables pour la chaussée (périodes de gel et dégel exclues). Il n'est ainsi pas tenu compte des variations saisonnières.

3.5.1. Calcul des sollicitations dans la chaussée sous l'essieu de référence

La méthode de dimensionnement retient pour le sol support un modèle élastique linéaire caractérisé par une valeur de module d'Young et une valeur de coefficient de Poisson prise égale à 0,35 à défaut d'autre indication. Le module d'Young retenu est la valeur de la borne inférieure de la classe de portance à long terme de l'arase de la PST.

Souvent cette simplification se justifie parce que la rigidité beaucoup plus élevée des couches d'assise en matériaux liés et les épaisseurs retenues pour le dimensionnement font que la diffusion des contraintes dues au trafic conduit à des sollicitations faibles au niveau du sol support.

3.5.2. Déformations permanentes du support de chaussée

Vis-à-vis du risque d'ornièrage du sol support par cumul de déformations permanentes sous la répétition des charges roulantes, la méthode de dimensionnement s'en tient actuellement à limiter l'amplitude de la déformation verticale ϵ_z du sol support calculée sous la charge de l'essieu de référence. Les relations du type $\epsilon_{z,ad} = f(N)$ (cf. VI.4.1.) sont d'origine empirique ; elles proviennent de l'observation de l'évolution de l'ornièrage de certaines chaussées bitumineuses.

Une approche plus analytique pour estimer la profondeur d'ornièrage du support nécessite des données expérimentales à l'appareil triaxial à chargement répété, ainsi qu'un modèle de calcul pour évaluer la répartition des contraintes sous l'essieu de référence et les déformations cumulées.



4. COUCHE DE FORME

4.1. ROLES ET CONCEPTION DE LA COUCHE DE FORME

La couche de forme est un élément de transition permettant d'adapter les caractéristiques des matériaux de remblai ou du terrain en place aux fonctions essentielles d'une plate-forme support de chaussée définies au paragraphe 2 plus haut. La couche de forme répond donc à la fois à des objectifs :

- à **court terme** (vis-à-vis de la réalisation de la chaussée) : nivellement, portance, protection du sol support, traficabilité ;
- à **long terme** (vis-à-vis de l'ouvrage en service) : homogénéisation, maintien dans le temps d'une portance minimale, contribution au drainage...

Selon les cas de chantier (nature des sols, climat, environnement hydrogéologique, trafic de chantier...), la couche de forme peut être :

- inexistante ou réduite à une mince couche de réglage, lorsque les matériaux constituant le remblai ou le sol en place ont eux-mêmes les qualités requises,
- constituée d'une ou plusieurs couches de matériaux différents incluant éventuellement un géotextile.

Le guide technique *Réalisation des remblais et des couches de forme* préconise une épaisseur de couche de forme (h_p) permettant d'assurer la circulation quasi tout temps des engins approvisionnant les matériaux de la couche de chaussée. Cette épaisseur est fonction du cas de PST et de la nature du matériau retenu pour la couche de forme.

Une étude technico-économique d'optimisation peut mener à retenir une épaisseur ($h_{c,d}$) supérieure pour obtenir une plate-forme de meilleure portance. Pour faire cette recherche d'optimum, il faudra une étude spécifique précisée plus loin, afin de cerner les caractéristiques mécaniques des matériaux.

4.2. LES MATÉRIAUX DE COUCHE DE FORME

Certains matériaux pourront être employés en couche de forme en l'état, d'autres pourront être rendus aptes moyennant une modification de leur nature et/ou de leur état afin de satisfaire à des critères concernant :

- l'insensibilité à l'eau,
- la dimension des plus gros éléments,
- la résistance sous circulation des engins de chantier,
- l'insensibilité au gel.

Le respect de l'ensemble de ces critères est nécessaire dans le cas des grands chantiers. Dans les autres cas, certaines exigences telles que la traficabilité tout temps peuvent être tempérées, en appréciant les écarts admissibles en fonction des risques encourus en particulier sur les délais d'exécution.

Tableau IV.2. – Classes de portance à long terme de la plate-forme support

Module (MPo)	20	50	120	200
Classe de plate-forme	PF1	PF2	PF3	PF4 *

* PF4 correspond à l'ancienne dénomination PEX introduite par Scétauroute dans le Manuel de conception des chaussées d'outoroute de 1986.

Figure IV.4.1. – Conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée					
					PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4	
					AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2	
B ₁ th		++ ou + ou = ou -	toutes conditions météo	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,8 ou (2)	e = 0,5 ou (2)	e = 0,4 ou (2)	e = 0,3 ou (2)	(3)
B ₁ h	Les sols de cette classe contiennent une fraction fine en faible quantité mais cependant suffisante pour leur conférer une grande sensibilité à l'eau. Leur fraction grenue est résistante et ne risque donc pas de se broyer sous l'action du trafic. Pour utiliser ces sols en couche de forme deux solutions sont applicables : a) Eliminer par tout moyen ad hoc la fraction o/d responsable de la sensibilité à l'eau. Le matériau ainsi élaboré devient insensible à l'eau et peut être utilisé en toutes situations météo. b) Traiter ces matériaux avec des liants hydrauliques en place (ou en centrale lorsqu'ils sont dans un état moyen ou sec).	++ ou +	pluie même forte	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,65	e = 0,4	e = 0,3	e = 0,2	(3)
				Solution 1 : G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3					
				Solution 2 : T : Traitement avec liant hydraulique	0 0 1 1	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	
B ₁ m		++ ou +	pluie même forte	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,8 ou (2)	e = 0,5 ou (2)	e = 0,4 ou (2)	e = 0,3 ou (2)	(3)
				Solution 1 : G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,65 PF2	e = 0,4 PF2	e = 0,3 PF2	e = 0,2 PF2	
				Solution 2 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec liant hydraulique	0 1 1 1	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	
B ₁ s		++ ou -	pluie même forte	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,8 ou (2)	e = 0,5 ou (2)	e = 0,4 ou (2)	e = 0,3 ou (2)	(3)
				Solution 1 : G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,65 PF2	e = 0,4 PF2	e = 0,3 PF2	e = 0,2 PF2	
				Solution 2 : W : Humidification pour changer l'état hydrique T : Traitement avec liant hydraulique	0 2 1 1	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	
B ₁ ts		++ ou + = ou -	toutes conditions météo	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,8 ou (2)	e = 0,5 ou (2)	e = 0,4 ou (2)	e = 0,3 ou (2)	(3)

(1) Sur cette PST, la mise en œuvre d'un matériau traité répondant à une qualité "couche de forme" n'est pas réalisable. Procéder d'abord à un traitement selon une technique "remblai" et se reporter alors au cas de PST n°4 si l'effet du traitement est durable et aux cas de PST n°2 ou 3 s'il ne l'est pas.

(2) Si intercalation d'un géotextile à l'interface PST-couche de forme.

(3) Dans le cas de la PST n°4, une couche de forme conduisant à une PF2 peut se limiter à une couche de protection superficielle de quelques centimètres d'épaisseur de ce matériau. Celle-ci peut même être inutile si l'on a prévu la possibilité d'éliminer par rabotage les 5 à 10 cm supérieurs de la PST. Elle peut également être remplacée par un enduit de cure gravillonné ou éventuellement clouté, appliqué directement sur l'arasement.

5. CLASSEMENT DES PLATES-FORMES SUPPORT POUR LE DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSÉE

La portance à long terme de la plate-forme support de chaussée est déterminée à partir du couple PST-caouche de forme.

5.1. CLASSES DE PORTANCE À LONG TERME DES PLATES-FORMES SUPPORT DE CHAUSSÉE

Il est défini quatre classes de portance à long terme déterminées par le tableau IV.2. selon la valeur du module de déformation réversible.

La vérification par des essais effectués en surface de la plate-forme (essai de plaque, à la Dynaplaque ou de déflexion) n'a de sens que **si les matériaux du support sont insensibles à l'eau ou si les conditions hydriques sont représentatives du long terme.**

Connaissant la classe de portance de l'arase de terrassement, AR_i , et le matériau de couche de forme, le classement de la plate-forme s'effectue ainsi :

- lorsque la couche de forme a l'épaisseur préconisée par le GTR, ce dernier précise dans des tableaux la classe de la plate-forme, comme le montre l'extrait reproduit par la figure IV.4.1. ;
- lorsque la couche de forme a une épaisseur inférieure à l'épaisseur préconisée, la classe de la plate-forme à retenir est celle de l'arase de terrassement.

Si, dans le cadre d'une étude d'optimisation globale chaussée/caouche de forme, on envisage une épaisseur de couche de forme supérieure à la valeur préconisée, la modélisation et les caractéristiques de portance de la plate-forme support de chaussée correspondante peuvent être abordées de deux façons :

- par le biais de règles de surclassement de portance exposées au paragraphe 5.2.
- par l'application de la méthode de calcul des chaussées comme exposé au paragraphe 5.3.

Dans les cas courants (auxquels se rattachent les cas où l'on fait application des règles de surclassement données au paragraphe 5.2.), pour les calculs de dimensionnement de la structure de chaussée, la plate-forme est assimilée à un demi-espace homogène auquel est affecté le module d'Young correspondant à la limite basse de la classe de portance PF_i (exemple 50 MPa pour PF_2).

Dans les cas où l'on identifie dans le modèle de calcul la couche de forme à l'instar d'une couche de chaussée, il faut disposer de données plus complètes et précises sur les caractéristiques mécaniques (déformation et résistance) du sol support et du matériau de couche de forme. Les caractéristiques retenues devront de plus être validées par des essais effectués sur la plate-forme support de chaussée :

- mesures de module de déformation réversible pour les matériaux non traités, à partir d'essai de chargement à la plaque ou au défectographe,
- module et résistance en fendage ou en traction mesurés sur carottes, dans le cas de matériaux traités aux liants hydrauliques.

Cette validation nécessite la réalisation d'un chantier expérimental, et des essais en nombre suffisant pour que les résultats puissent être tenus pour représentatifs.

Tableau IV.3.

Conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme non traitée

Classe de l'arase	Matériau de la couche de forme	Épaisseur matériau de couche de forme	Classe de la plate-forme obtenue
AR1	B31, C1B31, C2B31, D21, D31, R21, R41, R61, C1B11*, C2B11*, R11*, R42*, R62*	0,80 m **	PF3
AR2		0,50 m	

* Sous réserve d'une vérification sur la plate-forme support de chaussée.

** Une réduction d'épaisseur de l'ordre de 0,10 à 0,15 m peut être admise si l'on intercale un géotextile adapté entre la couche de forme et la PST.

Tableau IV.4. – Conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme en sol fin traité en place

Classe de l'arase	Matériau de la couche de forme	Épaisseur matériau de couche de forme	Classe de la plate-forme obtenue
AR1*	A3 traité à la chaux seule	0,50 m (en 2 couches)	PF2
	A1, A2, A3 traités à la chaux + ciment ou éventuellement ciment seul	0,35 m	
	A3 traité à la chaux seule	0,70 m (en 2 couches)	PF3
	A1, A2, A3 traités à la chaux + ciment ou éventuellement ciment seul	0,50 m (en 2 couches)	
AR2	A3 traité à la chaux seule	0,50 m (en 2 couches)	PF3
	A1, A2, A3 traités à la chaux + ciment ou éventuellement ciment seul	0,35 m	

* Sur une PST n°1, la mise en œuvre d'un matériau traité répondant à une qualité de couche de forme n'est pas réalisable. Il faut d'abord procéder à un traitement de l'arase selon une technique "remblai", ce qui renvoie alors à un cas de PST 2, 3 ou 4 selon le traitement.

5.2. REGLES DE SURCLASSEMENT DE PORTANCE DES PLATES-FORMES

L'épaisseur de matériau de couche de forme nécessaire pour permettre un surclassement de portance de la plate-forme support de chaussée se détermine :

- en examinant l'incidence de l'épaisseur et de la qualité de la couche de forme sur les contraintes et déformations dans les couches de chaussée et le sol support,
- en vérifiant que les contraintes de traction restent admissibles dans les couches de forme en matériaux traités.

Cette analyse du fonctionnement de la chaussée en service doit être complétée par la considération de la tenue de la couche de forme non protégée par le corps de chaussée sous le trafic de chantier.

L'effet, sur les contraintes et déformations dans les couches de chaussée, d'un accroissement donné d'épaisseur de la couche de forme dépend des caractéristiques mêmes de la chaussée. Par mesure de simplification, des règles identiques ont été données dans le *Catalogue 1977* pour les différentes chaussées souples et semi-rigides.

Ces règles, adaptées en fonction de la classification des sols du guide technique de 1992, sont données ci-après et étendues à un ensemble plus vaste de situations. Les épaisseurs proposées découlent de calculs de mécanique des chaussées pour l'analyse du compartement de la chaussée en service et de constatations de chantier sur la tenue sous le trafic de chantier des couches de forme.

5.2.1. Couches de forme en matériau non traité

Les épaisseurs de matériau de couche de forme permettant d'obtenir une plate-forme PF3 à partir d'une arase de classe AR1 au AR2 sont données dans le tableau IV.3¹.

5.2.2. Couches de forme en sols argileux ou limoneux traités en place

Les matériaux considérés ici sont :

- pour un emploi avec traitement à la chaux seule, les sols A3,
- pour un emploi avec traitement mixte à la chaux et au ciment, ou au ciment seul, les sols A1, A2 et éventuellement A3 ainsi que les matériaux C dont la fraction 0/50 mm est constituée par les sols précédents et lorsque la faisabilité du traitement est acquise. La nature du traitement est à choisir en fonction de l'argilosité et de l'état hydrique.

Les règles correspondant aux couches de forme réalisées avec ces sols sont présentées dans le tableau IV.4. Les autres cas de matériaux traités aux liants hydrauliques relèvent du paragraphe suivant.

L'étude de formulation doit préciser la résistance à obtenir au jeune âge compte tenu de la période d'exécution des travaux et de l'époque de mise en circulation de chantier.

1. On se référera au GTR pour les épaisseurs de couche de forme permettant d'atteindre PF2 à partir d'une arase AR1 ; l'épaisseur est variable selon le matériau de couche de forme et le cas de PST.

Figure IV.5.1.

Classement des matériaux de couche de forme traités aux liants hydrauliques

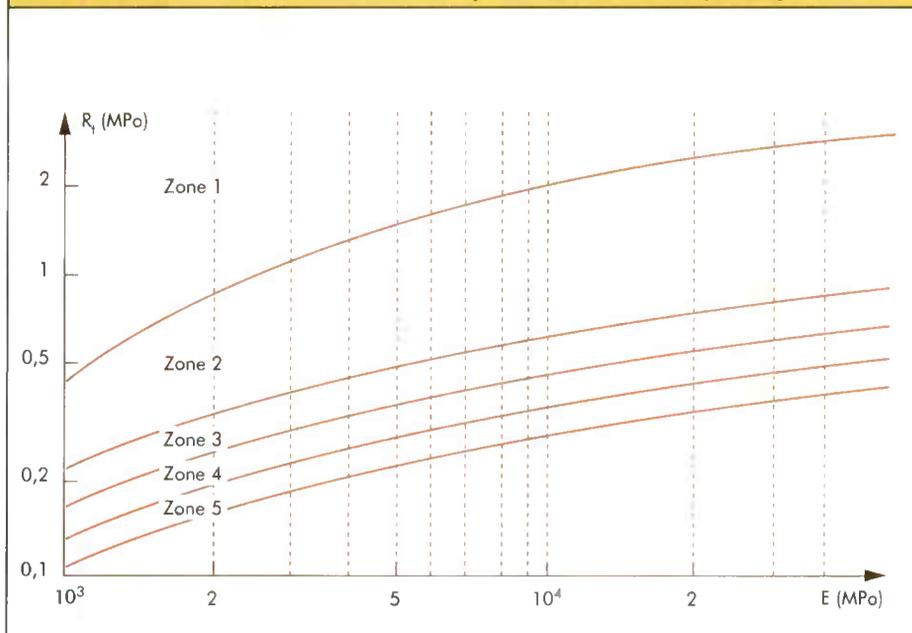


Tableau IV.5. – Détermination de la classe mécanique des sables et graves traités aux liants hydrauliques selon le mode de traitement

Traitement en centrale	Traitement en place	Classe mécanique
zone 1	–	1
zone 2	–	2
zone 3	zone 2	3
zone 4	zone 3	4
zone 5	zones 4,5	5

Tableau IV.6. – Conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme en matériaux traités aux liants hydrauliques

Classe de l'arase	Épaisseur de matériau de couche de forme (en cm)			Classe de la plate-forme obtenue
	Classe mécanique du matériau de couche de forme			
AR1 *	3	4	5	PF2
	**	30	35	PF3
	30	35	50 ***	PF4
AR2	40	45 ***	55	PF4
	25	30	35	PF3
	30	35	45 ***	PF4

* Pour les chantiers autoroutiers, Scétauroute retient une épaisseur majorée de 5 cm dans les cas d'AR1.

** L'épaisseur minimale de 30 cm permet un reclassement en PF3.

*** L'obtention de la compacité recherchée en fond de couche conduira généralement à une mise en œuvre en 2 couches.

5.2.3. Couches de forme en matériaux grenus traités ou liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux

Avec ces matériaux, il est possible, moyennant des conditions d'exécution et un dosage en liant adaptés, d'atteindre des valeurs de portance élevées et d'obtenir une plate-forme de classe PF3 voire PF4. L'épaisseur de la couche de forme à mettre en œuvre et le classement de la plate-forme dépendent :

- de la classe de portance du sol support,
- des caractéristiques mécaniques du matériau traité,
- du mode de traitement (en centrale ou en place).

Le matériau de couche de forme est qualifié par une "classe mécanique" déterminée à partir :

- de l'abaque de la figure IV.5.1. qui définit des zones selon les valeurs à 90 jours du module d'Young et de la résistance en traction directe correspondant à la compacité du fond de couche sur chantier ;
- du tableau IV.5. relatif au mode de traitement pour tenir compte de différences dans l'homogénéité du matériau traité.

Le tableau IV.6. précise les épaisseurs de couche de forme à mettre en œuvre pour les différentes classes mécaniques de matériau traité. Ces valeurs ont été déterminées en tenant compte des éléments suivants :

- une épaisseur minimale de 30 cm sur une orose AR1 pour assurer la tenue de la couche de forme ou jeune âge sous la circulation de chantier (cette épaisseur devient 25 cm sur une orose AR2),
- une vérification de la tenue en fatigue de la couche de forme traitée au sein de la structure de chaussée,
- en majorant de 5 cm environ les valeurs issues du calcul sur chaque couche unitaire pour tenir compte d'irrégularités d'épaisseur et de qualité de traitement à la base de la couche traitée, et de liaisons imparfaites entre les couches.

Comme pour les sols traités à la chaux, l'étude de formulation doit préciser la résistance à obtenir au jeune âge compte tenu de la période d'exécution des travaux et de l'époque de mise en circulation de chantier de la couche de forme.

5.3. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX DE COUCHE DE FORME POUR UNE ÉTUDE DE DIMENSIONNEMENT GLOBALE CHAUSSÉE/COUCHE DE FORME

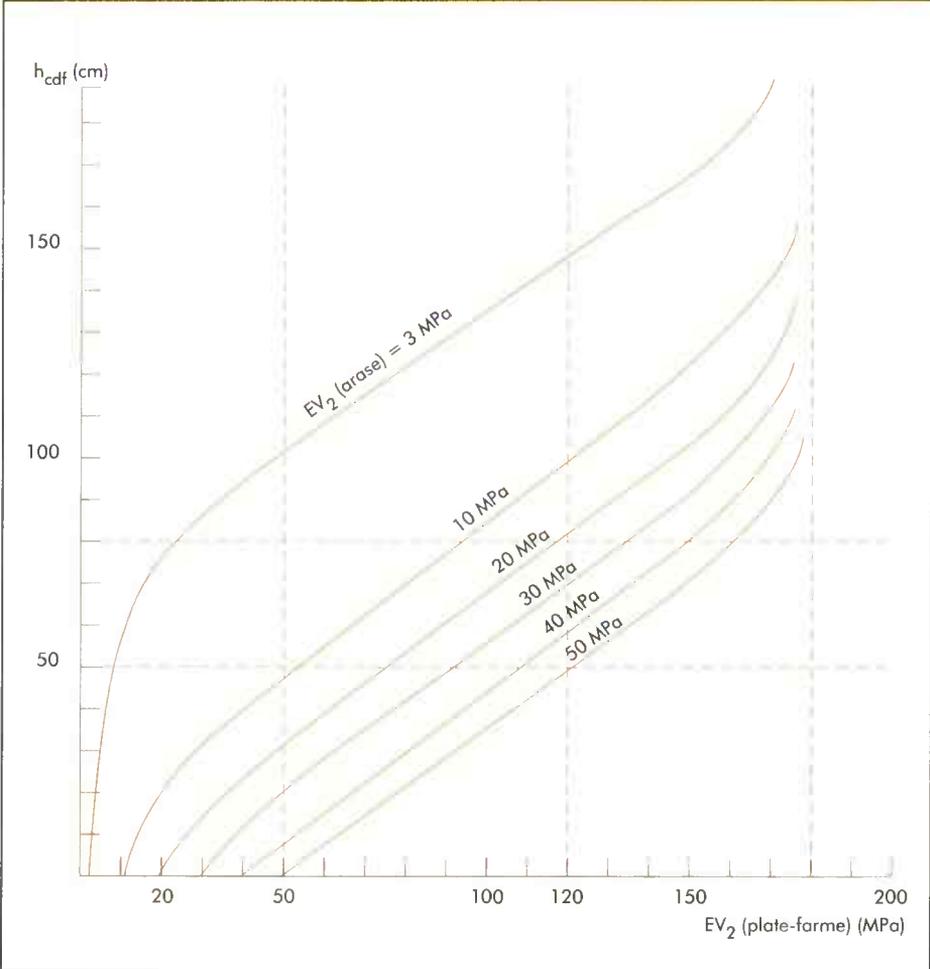
Dans les cas pour lesquels les règles de surclassement de portance données plus haut paraissent devoir être affinées et/ou adoptées à une situation particulière, il faut alors, dans le modèle de calcul, individualiser la couche de forme.

Les paragraphes suivants présentent les caractéristiques mécaniques nécessaires à la justification du dimensionnement de la couche de forme. On trouvera à l'annexe A.7. un exemple de calcul sur l'ensemble chaussée/couche de forme, ce qui vient compléter la partie VI.

5.3.1. Couche de forme en matériau non traité

Les matériaux granulaires non traités ont un comportement mécanique non linéaire, fonction des sollicitations qui leur sont appliquées, et ne résistent pas en traction.

Figure IV.5.2. – Module EV_2 sur la plate-forme de chaussée en fonction de l'épaisseur de couche de forme en grave et du module EV_2 sur l'arase de terrassement



Couche de forme en matériau granulaire



A défaut de modèle décrivant convenablement ce comportement rhéologique, on pourra évaluer la portance de la plate-forme support de chaussée en fonction de l'épaisseur de la couche de forme à partir de l'abaque de la figure IV.5.2. pour des matériaux roulés. Dans le cas de matériaux concassés, susceptibles de conduire à des modules plus élevés, on déterminera ce profil de variation à partir d'essais de chargement à la plaque pour des épaisseurs croissantes de matériau de couche de forme. Par approximation, pour le calcul de structure de chaussée, le support sera assimilé à un milieu élastique homogène affecté d'un module d'Young égal à la valeur d' EV_2 obtenue en surface de la plate-forme support et d'un coefficient de Poisson égal à 0,35.

Dans le calcul de dimensionnement de la structure de chaussée, la vérification faite sur la couche de forme concerne l'orniérage. Ceci est habituellement traité en examinant la déformation verticale à la surface supérieure de cette couche. La justification est conduite à l'aide des mêmes critères empiriques moyens que ceux indiqués pour le sol support.

5.3.2. Couche de forme en matériau traité

Le guide technique consacré au *Traitement des sols à la chaux, aux liants hydrauliques et pouzzolaniques*¹ [20] précise la nature des études de laboratoire destinées à apprécier l'aptitude au traitement, le comportement au jeune âge et les caractéristiques mécaniques à terme.

Pour les calculs de dimensionnement, les caractéristiques à retenir sont celles correspondant à la compacité du fond de couche sur chantier. Les grandeurs à déterminer sont :

- le module d'Young, E ,
- la résistance en traction directe R_t , ou par fendage, f_t .

A défaut de relation propre au matériau étudié, on retiendra entre ces deux valeurs la relation :

$$R_t = 0,8 f_t$$

Pour le coefficient de Poisson, on retiendra la valeur de 0,25.

Il ne faut pas perdre de vue que les matériaux non élaborés présentent des dispersions des caractéristiques d'état et mécaniques qui peuvent être importantes pour un même horizon géologique, et que le traitement en place n'assure pas la même homogénéité qu'un traitement en centrale (variabilité locale des teneurs en eau, irrégularités d'épandage...). Dans ces conditions, l'étude de laboratoire doit couvrir l'étendue des fluctuations attendues : de nature des matériaux, de teneur en eau et en liant...

Le choix de valeurs caractéristiques pour le calcul sera fait en analysant la dispersion sur les paramètres mécaniques et en se situant en partie basse du fuseau (moyenne moins un écart-type). Les valeurs estimées par l'étude de laboratoire devront être confirmées par des résultats obtenus sur échantillons prélevés en base de couche sur chantier.

A défaut de valeurs données par une étude spécifique, on se repertera à la partie V pour les paramètres descriptifs du comportement en fatigue en considérant le cas de matériau traité normalisé se rapprochant le plus du matériau traité de couche de forme.

1. Document en cours de rédaction en 1994.

5.4. JUSTIFICATION DU DIMENSIONNEMENT DES COUCHES DE FORME EN MATÉRIAUX TRAITÉS DANS UNE ÉTUDE GLOBALE CHAUSSÉE/COUCHE DE FORME

Le dimensionnement de la couche de forme est justifié comme une couche d'assise de chaussée traitée aux liants hydrauliques en considérant les deux situations suivantes :

- avant la réalisation des couches de chaussée, vis-à-vis du trafic de chantier, si la couche de forme est circulée,
- la chaussée construite.

Dans le premier cas, la couche de forme n'est pas protégée par la chaussée. Il sera au besoin vérifié qu'il n'y a pas rupture de la couche de forme sous les charges maximales à l'essieu des engins de chantier, en retenant les valeurs des caractéristiques mécaniques correspondant à l'âge auquel la couche de forme sera circulée.

Le dommage en fatigue subi par la couche de forme pendant la phase chantier n'est pas pris en compte dans le dimensionnement de la structure de chaussée.

Si l'auscultation effectuée pour la réception de la plate-forme support de chaussée révèle que la couche de forme a été dégradée pendant la phase chantier, les zones concernées devront être reprises ou le dimensionnement de la structure devra être reconsidéré en fonction des caractéristiques résiduelles de la plate-forme support.

Dans le second cas, les caractéristiques mécaniques à retenir sont celles à 360 jours comme pour les couches d'assise. Les résultats d'essais généralement obtenus à 28 ou 90 jours, selon le liant, seront transposés en valeurs à 360 jours nécessaires pour le calcul de dimensionnement, compte tenu des informations disponibles ou par analogie avec les valeurs données en partie V pour les matériaux normalisés traités aux liants hydrauliques.

Pour les calculs justificatifs, le critère à considérer est la résistance en traction à la base de la couche de forme traitée. La valeur de la contrainte de traction admissible $\sigma_{t,ad}$, pour N chargements, est donnée par la relation :

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_t (NE)$$

avec,

$$\sigma_t (NE) = \sigma_g (NE/10^6)^b$$

σ_g : contrainte pour laquelle la rupture en flexion sur éprouvette de 360 jours, est obtenue pour 10^6 chargements.

NE : nombre de chargements équivalents calculé à partir du trafic cumulé et du coefficient d'agressivité CAM (cf. VI.2.1.2.) en prenant pour CAM la valeur proposée pour les matériaux hydrauliques pour le trafic considéré.

Dans le modèle de calcul, les interfaces assise/couche de forme et couche de forme/sol support sont prises décollées avec glissement.

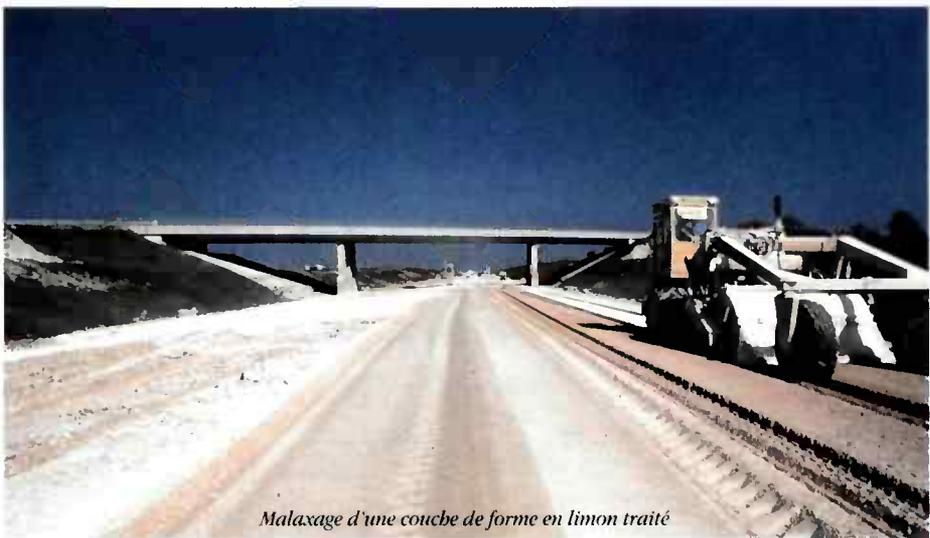
Dans le cas de traitement en place, la valeur d'épaisseur issue du calcul doit (sauf disposition particu-

lière) être majorée de 5 cm au moins pour tenir compte de facteurs défavorables tels que :

- les irrégularités de la géométrie de l'arasement,
- les fluctuations de position altimétrique de l'arbre de l'engin de malaxage.

L'épaisseur mise en œuvre en une couche est à fixer en fonction de la profondeur qu'il est possible de malaxer **et de compacter** pour obtenir l'objectif de compactage défini par le guide technique *Réalisation des remblais et des couches de forme*. Si le calcul conduit à une mise en œuvre en deux couches, la vérification sera faite en considérant qu'il y a glissement entre ces couches.

Si la couche de forme est rampue par le trafic de chantier, la vérification du dimensionnement de la chaussée est faite en considérant le matériau de couche de forme comme un matériau non traité. Le module sera réestimé à partir de mesures faites sur la plate-forme, la portance étant plafonnée à PF4. Il n'est pas alors fait de vérification en fatigue sur la couche de forme.



Malaxage d'une couche de forme en limon traité

Page laissée blanche intentionnellement



V. LES MATÉRIAUX DE CHAUSSÉE

1. INTRODUCTION

- 1.1. LE CONTEXTE FRANÇAIS
- 1.2. DESCRIPTION DES MATÉRIAUX
- 1.3. EXIGENCES RELATIVES À L'EMPLOI

2. LES CONSTITUANTS DE BASE

- 2.1. GRANULATS
- 2.2. LIANTS HYDRAULIQUES ET POZZOLANIQUES
- 2.3. LIANTS HYDROCARBONÉS
- 2.4. AUTRES CONSTITUANTS

3. LES GRAVES NON TRAITÉES

- 3.1. DESCRIPTION FAITE PAR LA NORME
- 3.2. EXIGENCES RELATIVES À L'EMPLOI
- 3.3. PERFORMANCES MÉCANIQUES POUR LE DIMENSIONNEMENT

4. LES MATÉRIAUX TRAITÉS AUX LIANTS HYDRAULIQUES

- 4.1. ÉLÉMENTS COMMUNS AUX DIVERS MATÉRIAUX TRAITÉS AUX LIANTS HYDRAULIQUES
- 4.2. GRAVES TRAITÉES AUX LIANTS HYDRAULIQUES ET POZZOLANIQUES
ET BÉTONS COMPACTÉS ROUTIERS
- 4.3. SABLES TRAITÉS AUX LIANTS HYDRAULIQUES

5. LES MATÉRIAUX TRAITÉS AUX LIANTS HYDROCARBONÉS À CHAUD

- 5.1. ÉLÉMENTS COMMUNS AUX DIFFÉRENTS MATÉRIAUX TRAITÉS AUX LIANTS HYDROCARBONÉS
À CHAUD NORMALISÉS
- 5.2. LES GRAVES-BITUME
- 5.3. LES ENROBÉS À MODULE ÉLEVÉ
- 5.4. LES DIVERS BÉTONS BITUMINEUX ET AUTRES ENROBÉS À CHAUD NORMALISÉS
- 5.5. LES SABLES-BITUME
- 5.6. LES ENROBÉS RECYCLÉS À CHAUD

6. LES MATÉRIAUX TRAITÉS À L'ÉMULSION DE BITUME

- 6.1. LES GRAVES-ÉMULSION

7. LE BÉTON DE CIMENT

Page laissée blanche intentionnellement

1. INTRODUCTION

La politique poursuivie depuis 1968 avec la publication, par la Direction des routes, de directives et de recommandations pour la formulation et la mise en œuvre des matériaux de chaussée a permis une certaine standardisation des familles de matériaux, par une limitation des variations de leurs propriétés mécaniques.

De l'application de cette politique s'est dégagée la possibilité de définir des portraits types des divers groupes de matériaux de chaussée, avec des caractéristiques minimales garanties servant de référence, et sur lesquels a été "calée" la méthode de dimensionnement pour les différentes structures.

L'approche rationnelle attachée au modèle mécanique qui fait l'originalité de la méthode française, permet d'étendre le champ de la méthode de dimensionnement à des matériaux et des structures s'écartant quelque peu des situations de référence. Pour ce qui est des matériaux, l'ingénieur se doit de raisonner par analogie sur le comportement, pour apprécier dans quelle mesure la méthode de dimensionnement proposée est applicable au cas considéré.

L'explicitation de la méthode de dimensionnement ne peut donc pas faire abstraction d'une description minimale des matériaux.

Après une brève présentation de la nature des documents français qui cadifient les produits et matériaux, la partie V introduit les différents matériaux de chaussée en faisant référence aux documents normatifs quand ils existent.

1.1. LE CONTEXTE FRANÇAIS

Les différentes techniques ont fait l'objet depuis la fin des années soixante d'une codification par le biais d'un ensemble de documents : directives, recommandations et notes techniques, publiés par la Direction des routes. Ces textes traduisent les exigences de l'État, maître d'ouvrage, pour le réseau routier national. Ils explicitent les dispositions techniques relatives :

- au choix des constituants et des mélanges qui forment les matériaux routiers élaborés,
- aux études de formulation et à la caractérisation des propriétés mécaniques,
- aux techniques de mise en œuvre et aux contrôles d'exécution.

Le respect de cet ensemble d'exigences permet d'obtenir, à partir d'un minimum d'études préalables, des structures de qualité adaptées à un contexte marqué par :

- une charge maximale à l'essieu de 130 kN,
- des périodes de gel pouvant être importantes.

D'autres maîtres d'ouvrages ont, depuis lors, édicté des spécifications particulières, en fonction des besoins de leur propre réseau.

Cette première diversité de textes fait progressivement place, pour les aspects techniques, à un ensemble homogène de normes couvrant :

- les essais,
- les constituants,
- les produits,
- et la qualification des matériels de fabrication et de mise en œuvre.

Les normes sur les constituants et produits en définissent nature et performances, et établissent des classifications selon des procédures cadifiées. En revanche, elles ne donnent en général pas de spécification d'emploi. Le choix de celles-ci relève du maître d'ouvrage.

Pour les produits dont la nouveauté ou l'emploi qui en est fait ne permet pas, au pas encore, la normalisation, la procédure d'**avis technique** [31] permet, à l'initiative de l'entreprise, de faire valoir par des experts tiers une opinion autorisée sur l'optitude du produit à un emploi donné.

1.2. DESCRIPTION DES MATÉRIEAUX

La suite de la partie V est organisée en chapitres regroupant par famille les différents matériaux de chaussée. Pour chaque famille, on décrit les éléments de définition et de comportement communs avant de présenter les caractéristiques propres à chaque technique et utiles au dimensionnement.

1.2.1. Matériaux définis par des normes

Pour les matériaux de chaussée couverts par des normes, on fait un bref rappel des prescriptions se rapportant aux constituants et au mélange. Le lecteur est invité à se reporter au texte des normes pour plus de détails. Cette description est ensuite complétée par la définition des caractéristiques mécaniques nécessaires au dimensionnement des structures de chaussée.

Pour chaque type de matériau enfin, on définit comment les paramètres de calcul, utilisés dans les modèles mathématiques décrits par la partie VI, doivent être déduits des résultats des essais de laboratoire.

1.2.2. Matériaux hors normes

Les conditions économiques et les ressources locales peuvent conduire à rechercher l'emploi de matériaux non codifiés par une norme ou dont l'une au moins des caractéristiques n'est pas en conformité avec les exigences des normes :

- graves, sables provenant de gisements naturels et non élaborés,
- liants spéciaux,
- sous-produits industriels, matériaux de démolition...

Dans ce cas, les constituants et le mélange doivent faire l'objet d'une étude complète de formulation et de détermination des propriétés mécaniques. L'étude doit en particulier couvrir la plage de variation probable des caractéristiques physiques et mécaniques compte tenu des constituants et des conditions de mise en œuvre.

La décision d'emploi de ces matériaux est à prendre par référence aux catégories de matériaux normalisés les plus proches du point de vue de la composition et du comportement.

1.3. EXIGENCES RELATIVES À L'EMPLOI

Il revient au maître d'ouvrage de fixer les classes de matériaux considérées par lui comme acceptables compte tenu :

- de l'emploi qui est fait de ces matériaux,
- des risques admis pour la tenue de l'ouvrage, et ce, en fonction des ressources locales et des conditions économiques.

Les exigences sur les qualités des constituants et les performances des mélanges seront en général d'autant plus élevées que le trafic est fort et que la couche de chaussée est proche de la surface. Dans le cas des chaussées à faible trafic (T inférieur ou égal à $T3$), une plus large plage de matériaux et de caractéristiques peut répondre aux besoins du fait d'un nombre de sollicitations plus faible, et de risques de détérioration généralement plus élevés admis pour la chaussée.

2. LES CONSTITUANTS DE BASE

Ce chapitre traite des matériaux de base : granulats, liants hydrauliques ou pouzzolaniques, liants hydrocarbonés et constituants divers (eau, activateurs, retardateurs...), qui entrent dans la composition des mélanges constituant les matériaux de chaussée décrits par la suite.

2.1. GRANULATS

La France a des ressources diversifiées en roches massives et en granulats alluvionnaires. L'équipement des carrières et ballastières en dispositifs de concassage et de criblage permet l'obtention de granulats classés et d'un indice de concassage élevé.

La norme P 18-101 définit des catégories à partir de caractéristiques intrinsèques et de fabrication.

Pour les granulats d/D, la norme distingue :

- six catégories (A à F) de résistance mécanique à partir des valeurs de l'essai Los Angeles L_A (P 18-573), micro-Deval en présence d'eau M_{DE} (P 18-572) et de résistance au polissage C_{PA} (P 18-575) ;
- quatre catégories (I à IV) de caractéristiques de fabrication, à partir de la granularité (P 18-560), de la forme, coefficient d'aplatissement A (P 18-561) et de la propreté superficielle (P 18-591).

Pour les sables et graves 0/D, la norme définit trois catégories (a, b et c) à partir de la granularité, de la propreté : équivalent de sable à 10 % de fines (P 18-597), essai au bleu de méthylène à la tache (P 18-592) et teneur en fines du sable 0-2 mm (P 18-592).

Les normes relatives aux matériaux de chaussée élaborés précisent les groupes de caractéristiques minimales qui peuvent être retenues ainsi que les spécifications sur les caractéristiques complémentaires telles que l'angularité.

Spécifications d'usage

Les qualités recherchées pour les couches d'assise concernent principalement :

- la granularité et la propreté des sables et gravillons,
- la dureté des gravillons,
- l'angularité qualifiée par l'indice ou le rapport de concassage.

Les exigences sont en général plus sévères en couche de base qu'en couche de fondation.

Pour les granulats des couches de roulement, des exigences particulières sont fixées en matière de résistance au polissage. Sur le réseau des routes nationales, l'emploi de gravillons calcaires est ainsi exclu.

2.2. LIANTS HYDRAULIQUES ET POUZZOLANIQUES

Les liants disponibles sont très divers : produits industriels tels que les ciments, liants obtenus à partir de sous-produits industriels comme les laitiers de haut-fourneau et les cendres volantes de houille ou de lignite, matériaux naturels tels que les pouzzolanes, ou encore mélanges préparés à partir de plusieurs des matériaux ci-dessus.

La plupart de ces matériaux sont codifiés par des normes. On distingue ainsi :

- les liants hydrauliques formant, par réaction directe avec l'eau, des composés hydratés stables :
 - les ciments normalisés (NF P 15-301),
 - les cendres hydrauliques, cendres sulfocalciques résidu de combustion de certains lignites (NF P 98-112),
 - les liants spéciaux à usage routier ;

Ces derniers sont des produits d'entreprise, non normalisés, dont l'utilisation doit respecter les définitions et compositions données par la norme Graves-liant spécial routier (NF P 98-122). Ils font l'objet d'un avis technique ou d'une procédure d'agrément équivalente.
- les liants ayant des propriétés hydrauliques qui ne se manifestent qu'en présence d'un activant de prise : laitiers de haut-fourneau vitrifiés, granulés ou bouletés (NF P 98-106) le plus souvent prébroyés ;
- les liants ayant des propriétés pouzzoloniques formant par combinaison avec de la chaux des composés hydratés stables en présence d'eau :
 - les cendres volantes silico-alumineuses (NF P 98-110),
 - les pouzzolanes (NF P 98-103).

Spécifications d'usage

Pour le réseau routier national, elles sont données dans les directives et recommandations relatives aux matériaux traités aux liants hydrauliques.

2.3. LIANTS HYDROCARBONÉS

Les liants hydrocarbonés sont définis et classés par la norme T 65-000 qui distingue :

- les bitumes purs (T 65-001),
- les bitumes fluidifiés (T 65-002) issus d'un mélange avec un diluant d'origine pétrolière,
- les bitumes fluxés (T 65-003) additionnés d'une huile d'origine houillère ou pétrolière,
- les bitumes composés (T 65-004) formés d'au moins 50 % de bitume additionné de goudron ou de brai de houille,
- les émulsions de bitume (NF T 65-011),
- les goudrons purs (T 66-021) ou modifiés (T 66-022) plus guère utilisés en technique routière,
- les bitumes modifiés, comportant des ajouts de substances le plus souvent macromoléculaires ayant un effet direct sur le liant, par opposition aux fines minérales et additifs d'adhésivité.

En 1994, ces bitumes modifiés ne sont pas encore décrits par des normes. Les substances les plus couramment utilisées sont les élastomères SBS, les plastomères EVA et les poudrettes de caoutchouc. Ces modifications visent à réduire la susceptibilité thermique du bitume de base et à améliorer les caractéristiques de résistance en fatigue.

A signaler enfin les bitumes spéciaux, qui sont des bitumes purs sans additif dont certaines caractéristiques sont hors norme (exemple : bitumes très durs 10/20, liants fluides de régénération pour le recyclage des enrobés, bitumes à faible susceptibilité thermique...).

Spécifications d'usage

Pour les couches de roulement et de liaison en béton bitumineux et les couches d'assise en grave-bitume, des bitumes purs ou modifiés sont employés. Les classes de bitume pur les plus fréquemment retenues sont 35/50 et 50/70 pour les couches d'assise et les couches de surface. L'emploi de bitumes de grade diffé-

rent, durs, 10/20, 20/30 ou au contraire plus mous, 70/100, est à considérer dans des contextes particuliers (trafic, température et zone à risque d'orniérage élevés, ou trafic modéré et climat plutôt froid).

2.4. AUTRES CONSTITUANTS

Cette rubrique regroupe divers matériaux de base utilisés pour élaborer les matériaux de chaussée.

2.4.1. Eau d'apport

L'eau d'apport pour les graves non traitées ou traitées aux liants hydrauliques et pour le béton doit être conforme à la norme NF P 98-100.

2.4.2. Chaux

Les chaux aériennes calciques pour usage routier sont spécifiées et classées dans la norme NF P 98-101. Chaque norme produit définit la catégorie de chaux à utiliser.

2.4.3. Autres activants de prise de la grave-laitier

La norme NF P 98-107 définit et classe les types d'activation des laitiers vitrifiés de haut-fourneau, et fixe les caractéristiques générales auxquelles doivent satisfaire les activants. L'activation par la chaux est de type calcique; les autres activants couramment utilisés sont des produits à base de gypse ou de cendres volantes hydrauliques éventuellement additionnées d'une base.

2.4.4. Retardateur de prise

Ces produits sont décrits dans la norme NF P 98-115.

2.4.5. Fines d'apport pour enrobés hydrocarbonés

L'addition de fines lors de la fabrication d'enrobés est nécessaire lorsque la teneur en fines naturelles des granulats est insuffisante. Ces fines d'apport sont le plus souvent constituées de calcaire brayé, parfois de chaux grasse, de cendres volantes ou de ciment. Leurs spécifications sont données dans les normes produits des enrobés hydrocarbonés.

2.4.6. Dopes d'adhésivité

Ces produits destinés à améliorer la tenue à l'eau des enrobés, l'adhésivité liant-granulats, ou liant-ancienne chaussée pour les enduits, ne font pas l'objet de spécifications. Leur efficacité est jugée à travers l'amélioration du rapport immersion-compression de l'essai Duriez (NF P 98-251-1) ou par des essais d'affinité liant-granulats tel l'essai à la plaque Vialit (NF P 98-274-1).

3. LES GRAVES NON TRAITÉES

La norme NF P 98-129 réunit sous l'appellation de graves non traitées les divers mélanges de granulats et d'eau sans liant.

3.1. DESCRIPTION FAITE PAR LA NORME

La norme distingue les graves non traitées selon certaines de leurs caractéristiques et suivant leur mode d'élaboration :

- les GNT "A" obtenues en une seule fraction, sans ajout d'eau, dont l'homogénéité de la granularité est codifiée,
- les GNT "B" obtenues par recomposition de plusieurs fractions granulaires distinctes, dans des proportions définies et qui sont malaxées et humidifiées en centrale (appellation traditionnelle GRH : **grave reconstituée humidifiée**).

3.1.1. Spécifications se rapportant aux constituants

Les caractéristiques des granulats sont choisies selon la norme P 18-101. Les constituants granulaires des GNT sont distingués à partir des caractéristiques de dureté des gravillons, de propreté des sables et de la grave, ainsi que de l'angularité dans le cas des matériaux d'origine alluvionnaire.

Les matériaux non traités utilisés en assise de chaussée ne doivent pratiquement pas contenir de fines argileuses. Ainsi les sables entrant dans leur composition sont normalement de catégorie b ou exceptionnellement de catégorie c.

3.1.2. Spécifications se rapportant aux mélanges

- Granularité des mélanges

Les valeurs nominales possibles de D sont 14, 20 et 31,5 mm ainsi que 63 mm pour les seules GNT "A".

Des fuseaux de spécification sont définis pour chacune de ces valeurs de D.

- Compacité

A l'OPM, la compacité des GNT doit respecter les valeurs minimales définies par le tableau V.3.1.

Tableau V.3.1.
Compacité minimale à l'OPM des GNT normalisées

Type de GNT	Compacité à l'OPM (%)
GNT "A" *	80
GNT "B" : B1	83
GNT "B" : B2	82

* Pour D au plus égal à 31,5 mm

- Teneur en eau

La teneur en eau de mise en œuvre, fixée par référence à celle de l'OPM déterminée lors de l'étude de formulation, est généralement comprise dans l'intervalle $w_{OPM} - 1$ à $w_{OPM} + 0,5$.

Hors nappe, la teneur en eau des GNT dans les chaussées en service est, généralement, inférieure à ces valeurs. En l'absence de données provenant de relevés de terrain, on peut considérer la valeur $w_{OPM} - 2$ comme probable.

3.1.3. Spécifications sur les performances mécaniques

La norme ne comporte pas de spécification sur des valeurs de performances mécaniques mais, si la GNT mise en œuvre risque de subir le gel, le comportement du matériau doit être caractérisé à partir de l'essai de gonflement au gel (norme NF P 98-234-2).

En annexe informative non homologuée, la norme mentionne que les performances mécaniques (module d'Young, coefficient de Poisson et déformations permanentes) d'une GNT peuvent être déterminées à partir de l'essai triaxial à chargements répétés. Les performances mécaniques des GNT dépendant du niveau de contrainte, le classement des GNT est fait en retenant comme paramètres :

- une valeur de module d'Young, notée E_c (correspondant à un chargement cyclique sous une contrainte moyenne $p = 250$ kPa et un déviateur $q = 500$ kPa).
- une valeur de déformation axiale permanente, notée $A1_c$ (obtenue pendant la phase de conditionnement de l'éprouvette).

3.2. EXIGENCES RELATIVES À L'EMPLOI

L'emploi des GNT dans les structures souples est à limiter aux trafics faibles et moyens selon la portance de la plate-forme support ($T \leq T2$ sur PF1, $T \leq T1$ sur PF2 et supérieures). L'emploi des GNT en couche de base est limité aux trafics inférieurs ou égaux à T3.

Pour les trafics moyens (T1 et T2), on n'utilisera que les GNT "B".

Le Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic de 1981 [4] avait modulé les exigences relatives aux graves non traitées, selon l'importance du trafic et la nature de la couche de chaussée, à partir des caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la GNT.

3.3. PERFORMANCES MÉCANIQUES POUR LE DIMENSIONNEMENT

Les matériaux granulaires ont un comportement non-linéaire. Les caractéristiques mécaniques affectées à ces couches dans un calcul de dimensionnement devraient donc en toute rigueur dépendre de la structure (épaisseur et rigidité des couches liées, portance du support).

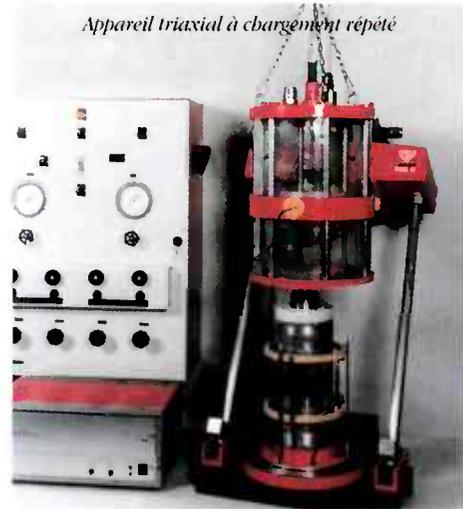
L'essai triaxial à chargement répété permet de caractériser :

- les paramètres descriptifs du comportement quasi-réversible,
- l'évolution des déformations permanentes sous chargements répétés.

Des résultats de ces essais, pratiqués sur des éprouvettes à une teneur en eau représentative des conditions hydriques les plus défavorables attendues pour la couche de chaussée, on peut sélectionner, pour le calcul des sollicitations dans la structure, des valeurs de E et ν cohérentes avec le niveau de contrainte dans la couche de grave non traitée.

La méthode de dimensionnement (cf. partie VI) fait cependant encore appel à une description très simplifiée du compartement de ces matériaux et ne retient qu'un modèle élastique linéaire.

A défaut de résultats d'essais triaxiaux, et dans l'attente d'une démarche unifiée pour la détermination des valeurs à affecter au module d'Young de la GNT selon le cas de figure rencontré, le tableau V.3.2. rappelle les valeurs retenues en pratique.



Les conditions sur la GNT, associées aux valeurs de module du tableau V.3.2. des catégories 1, 2 ou 3 pour un emploi en couche de base en chaussées à faible trafic, sont indiquées dans le tableau V.3.3.

Tableau V.3.2.
Valeurs de module d'Young des couches de GNT pour le dimensionnement

• **Chaussées à faible trafic ($T \leq T3$)**

Couche de base

catégorie 1 * $E_{GNT} = 600 \text{ MPa}$

catégorie 2 * $E_{GNT} = 400 \text{ MPa}$

catégorie 3 * $E_{GNT} = 200 \text{ MPa}$

Couche de fondation

(GNT subdivisée en sous-couches de 0,25 m d'épaisseur)

$E_{GNT} [1] = k E_{\text{plate-forme support}}$

$E_{GNT} [\text{sous-couche } i] = k E_{GNT} [\text{sous-couche } (i-1)]$

k variant selon la catégorie de la GNT

Catégorie	1	2	3
k	3	2,5	2

E_{GNT} borné par la valeur indiquée en couche de base

• **Chaussées à moyen trafic ($T2$ et $T1$) : structures GB/GNT**

Couche de fondation

(GNT subdivisée en sous-couches de 0,25 m d'épaisseur)

$E_{GNT} [1] = 3 E_{\text{plate-forme support}}$

$E_{GNT} [\text{sous-couche } i] = 3 E_{GNT} [\text{sous-couche } (i-1)]$

E_{GNT} borné par 360 MPa

• **Chaussées à structure inverse**

$E_{GNT} = 480 \text{ MPa}$

* conditions précisées dans le tableau V.3.3.

Nota : les différences de valeurs de module selon la structure rendent compte dans une certaine mesure du caractère non-linéaire des GNT (module plus élevé en couche de base qu'en couche de fondation, valeur plus élevée pour une faible couverture bitumineuse).

*Tableau V.3.3.
Conditions sur les GNT pour emploi en couche de base des chaussées à faible trafic*

Critère	emploi en catégorie 1		emploi en catégorie 2		emploi en catégorie 3
	T3	T < T3	T3 -	T4 - T5	T5
d/D	0/20		0/20	0/31,5	jusqu'à 0/60
Propreté	b		c		$35 \leq ES_{10\%} \leq 40$
Dureté	C	D	C	D	$L_A < 50$ et $M_{DE} < 45$
I_c	100	≥ 60	≥ 60	≥ 30	
Fines					$I_p \leq 6$

Pour le coefficient de Poisson, on retiendra une valeur égale à 0,35, à défaut d'autre information.

Vis-à-vis du risque d'arnérage enfin, la vérification est faite couramment en considérant un critère empirique sur la valeur de la déformation réversible verticale ϵ_z (cf. VI.4.1.) non différencié selon les matériaux. Ceci n'appelle donc pas de caractérisation complémentaire.

4. LES MATÉRIAUX TRAITÉS AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Dans ce chapitre, on examine :

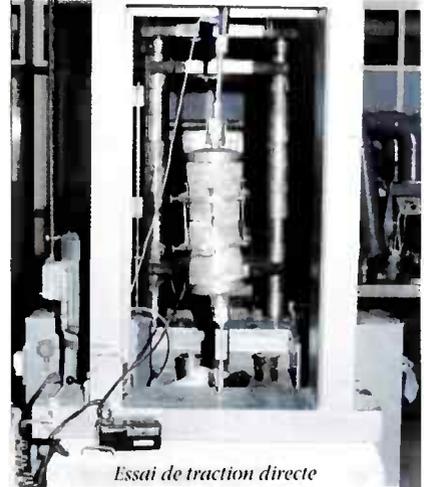
- les graves traitées aux liants hydrauliques et les bétons routiers compactés qui s'approchent des graves traitées par leur mode d'étude et de mise en œuvre (paragraphe 4.2.),
- ainsi que les sables traités aux liants hydrauliques (paragraphe 4.3.) non encore normalisés en 1994.

4.1. ÉLÉMENTS COMMUNS AUX DIVERS MATÉRIAUX TRAITÉS AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Les performances mécaniques prises en compte pour le classement des matériaux traités aux liants hydrauliques sont les valeurs obtenues à 360 jours :

- de résistance en traction directe R_{1360} ,
- et de module sécant E_{360} , à 30 % de la charge de rupture.

Ces valeurs sont déduites d'essais de traction directe (NF P 98-232-2) sur éprouvettes réalisées en vibrocompression, conservées en étui étanche à une température de 20 °C. La résistance mécanique du béton compacté est usuellement tirée d'essais de traction par fendage (NF P 98-408).



Le compartement en fatigue est apprécié par des essais en flexion sur des éprouvettes trapézoïdales encastrées à leur base (NF P 98-233-1). Les résultats des essais de fatigue s'avérant dispersés, il est difficile d'avoir la courbe entière avec un nombre raisonnable d'essais. Pour ces raisons, on s'attache à déterminer le niveau de contrainte σ_6 correspondant à 10^6 cycles de chargement et l'écart-type, SN, de la dispersion de $\log N$ à ce niveau de contrainte.

Pour les matériaux traités aux liants hydrauliques, les résultats d'essais peuvent être représentés par une équation de la forme :

$$\sigma / f_f = 1 + \beta \log N$$

La valeur de la pente β est déterminée, au voisinage de 10^6 cycles, en fonction de σ_6 et de la résistance en flexion au premier chargement f_f . Pour la commodité des calculs, la relation précédente est approchée, en considérant l'intervalle $[10^5 \text{ à } 10^7]$ cycles, par l'expression :

$$\sigma = \sigma_6 (N / 10^6)^b$$

avec β et b liés par la relation :

$$b = -0,5 \log [(1 + 5 \beta) / (1 + 7 \beta)]$$

Dans les cas de trafics cumulés très élevés (supérieurs à 10^7 cycles), l'ajustement sera fait en considérant l'intervalle $[10^6 \text{ à } 10^8]$ cycles.

4.2. GRAVES TRAITÉES AUX LIANTS HYDRAULIQUES ET POUZZOLANIQUES ET BÉTONS COMPACTÉS ROUTIERS

Les techniques du traitement des graves par des liants hydrauliques et pouzzolaniques ont fait l'objet d'une codification par différents documents depuis 1969. Désormais cette codification est précisée par des normes AFNOR, établies pour les diverses natures de liants.

Les prescriptions des normes sont complétées par des spécifications d'usage, de fabrication et de mise en œuvre, définies par le maître d'ouvrage. Pour les routes du réseau national, ces recommandations sont regroupées dans la directive pour la *Réalisation des assises de chaussées en graves traitées aux liants hydrauliques* [28] de juin 1983 et la recommandation pour la *Réalisation des chaussées en béton compacté* [30] de novembre 1985 de la Direction des routes.

Les graves traitées et les bétons compactés routiers répondant à ces exigences sont caractérisés par des granulats sélectionnés et un traitement en centrale.

4.2.1. Description faite par les normes

Ces matériaux sont des mélanges codifiés, de granulats, de liant hydraulique ou pouzzolanique et d'eau, fabriqués en centrale, et mis en œuvre selon les prescriptions de la norme *Exécution des corps de chaussée* (NF P 98-115).

On distingue :

- les graves-ciment (NF P 98-116),
- les graves-pouzzalanes-chaux (NF P 98-117),
- les graves-laitier (NF P 98-118),
- les graves-cendres volantes-chaux (NF P 98-119),
- les graves-cendres hydrauliques (NF P 98-120),
- les graves-liant spécial routier (NF P 98-122),
- les graves-laitier-cendres volantes-chaux (NF P 98-123),
- les bétons compactés routiers et les graves traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques à hautes performances (NF P 98-128).

Les normes comportent des prescriptions sur les constituants et la composition du mélange, et établissent un classement selon les performances mécaniques.

• Spécifications se rapportant aux constituants

L'ensemble des constituants doivent être choisis par référence aux normes AFNOR (cf. annexe A.2.).

• Spécifications se rapportant aux mélanges

La composition du mélange est définie après une étude en laboratoire effectuée selon la norme NF P 98-114 en vue des objectifs rappelés ci-après.

– Granularité des mélanges

Les graves traitées ont une granularité continue caractérisée pour chaque produit par un fuseau et la dimension maximale des éléments, D , (20 ou 14 mm). Pour les bétons compactés routiers, la dimension maximale des granulats de 20 mm peut être ramenée à 14 mm, voire 10, pour éviter la ségrégation et améliorer la qualité de surface.

– Compacité

La composition granulométrique doit conduire à une compacité à l'OPM égale ou supérieure à 0,80.

– Dosage en liant

Le tableau V.4.1. présente les intervalles courants de dosage en liant de la formule de base.

– Teneur en eau

En laboratoire, les meilleures performances sont obtenues pour une teneur en eau généralement comprise dans les intervalles indiqués par le tableau V.4.1.

Tableau V.4.1. – Dosages moyens en liant et intervalles de teneur en eau pour les graves traitées et les bétons compactés routiers

	Nature du liant	Dasage, moyen en liant	Intervalle de teneur en eau
Graves traitées	Ciment	3 à 4 %	$w_{OPM} - 1$ à w_{OPM}
	Liant spécial routier	3 à 5 %	$w_{OPM} - 1$ à w_{OPM}
	Laitier prébrayé + activant	8 à 15 %	$w_{OPM} - 2$ à w_{OPM}
	Laitier granulé + activant	8 à 20 %	$w_{OPM} - 2$ à w_{OPM}
	Pauzzalanes + chaux	15 à 25 %	$w_{OPM} - 1,5$ à $w_{OPM} + 1,5$
	Cendres volantes silica-alumineuses + chaux (mélange 80 % CV, 20 % chaux éteinte ou 86 % CV, 14 % chaux vive)	10 à 15 %	$w_{OPM} - 1$ à $w_{OPM} + 2$
	Cendres hydrauliques	3,5 à 4 %	$w_{OPM} - 1$ à w_{OPM}
Bétons compactés routiers	Ciment et liants spéciaux routiers	5 à 12 %	
	Laitiers activés	10 à 20 %	4 à 7 %
	Cendres volantes silica-alumineuses + chaux	13 à 20 %	

– Délai de maniabilité

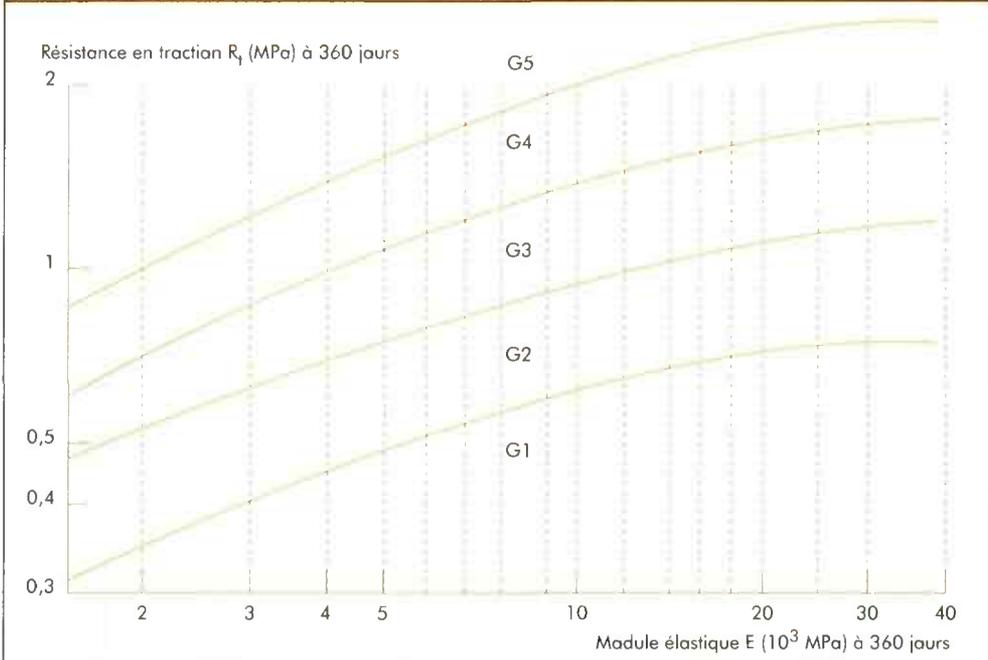
La valeur du délai minimal de maniabilité, défini selon la norme NF P 98-231-5, est choisie selon la technique et les conditions de réalisation propres au chantier.

• Spécifications sur les performances mécaniques

Ces différents matériaux sont classés selon les valeurs, à 360 jours, de résistance en traction directe R_{t360} et de module sécant E_{360} dans le diagramme reproduit par la figure V.4.1.

Les classes G4 et G5 sont réservées aux matériaux de la norme NF P 98-128; il s'agit des bétons compactés routiers et des "graves traitées aux liants hydrauliques et pauzzalaniques à hautes performances".

Figure V.4.1. – Classes de performance mécanique des matériaux traités aux liants hydrauliques (graves traitées et bétons compactés routiers)



Pour les bétons compactés routiers, lorsque la résistance est estimée à partir de l'essai de traction par fendage, f_t , on admettra les relations suivantes :

$$R_{t360} = 0,8 f_{t360}$$

$$E_{360} = 12\,000 f_{t360}$$

4.2.2. Exigences relatives à l'emploi

- Chaussées à moyen et fort trafic (T supérieur à $T3$)

– Granularité des mélanges

La classe 1, du classement de granularité défini dans les normes relatives aux produits, répond le mieux à l'objectif de stabilité et d'engrènement des bords des fissures de retrait thermique.

– Performances mécaniques

Pour ces chaussées, l'utilisation en couches de base et de fondation des matériaux des classes G2 et supérieures définies par les normes est à préférer.

Dans le cas de bétons compactés routiers, l'emploi de matériaux de classe G5 est à préférer.

- Chaussées à faible trafic (T inférieur ou égal à $T3$)

Dans ce cas, une plus large plage de matériaux et de caractéristiques peut répondre aux besoins du fait d'un nombre de sollicitations plus faible et de risques de détérioration plus élevés généralement admis pour la chaussée.

– Granulats

Pour les sables, du point de vue propreté, la catégorie c peut être retenue si les résultats de l'étude mécanique donnent une résistance suffisante.

Pour les gravillons, avec les trafics les plus faibles, on peut considérer l'emploi en couche de fondation de gravillons classés en catégorie F pour la dureté, avec cependant comme bornes :

$$L_A + M_{DE} < 95 ; L_A < 50 \text{ et } M_{DE} < 50.$$

Pour les graves enfin, en matière d'angularité, un matériau roulé peut être admis sous réserve d'une stabilité suffisante avant prise.

4.2.3. Spécifications relatives à la mise en œuvre

L'épaisseur minimale d'une couche de grave traitée ou de béton compacté est de 15 cm. Avec les matériels actuels et les conditions définies par le guide SETRA-LCPC *Compactage des assises de chaussées traitées aux liants hydrauliques ou non traitées* [27], l'épaisseur maximale compactée en une couche peut atteindre 35 cm. Épaisseur et intensité de compactage doivent être choisies pour que la compacité minimale requise soit obtenue sur toute l'épaisseur de la couche, en veillant à ne pas provoquer de feuilletage ni fragmenter les gravillons en surface dans le cas de matériaux relativement tendres.

Dans les régions sujettes au gel, la période de mise en œuvre doit tenir compte, selon le liant, du délai de prise pour que les graves traitées aient une résistance suffisante au moment du gel.

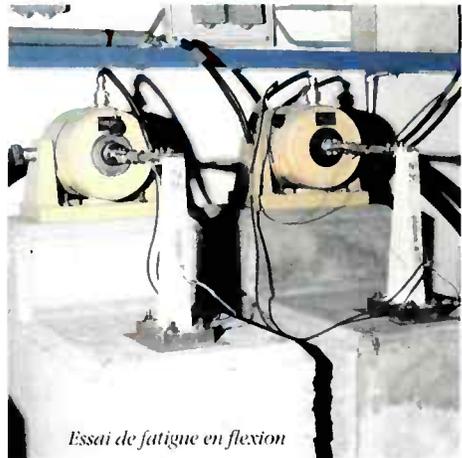
4.2.4. Performances mécaniques pour le dimensionnement

• Comportement en fatigue

Dans les études courantes portant sur des matériaux conformes aux normes, le comportement en fatigue est estimé à partir de seuls essais de traction directe par le biais de corrélations entre :

- la résistance en flexion f_f et la résistance en traction simple R_t ,
- la contrainte de rupture pour un million de chargements σ_6 et f_f .

Le tableau V.4.2. présente des valeurs moyennes issues d'études en fatigue faites par les Laboratoires des Pans et Chaussées pour les rapports f_f/R_t et σ_6/f_f , ainsi que les valeurs de σ_6/R_t et de la pente $-1/\beta$ qui en découlent¹.



Essai de fatigue en flexion

1. Pour une technique de grave traitée aux liants hydrauliques donnée (la nature du liant étant donc fixée), on peut trouver des variations significatives de ces valeurs avec la nature des granulats et selon la formulation.

Tableau V.4.2.

Valeurs indicatives des caractéristiques en fatigue de matériaux traités aux liants hydrauliques

Matériau	f_t/R_t	σ_6/f_t	σ_6/R_t	- 1/ β
Grave-ciment	1,8	0,525	0,95	12,6
Grave-laitier granulé				
Grave-laitier prébrayé (activée à la chaux *)	2	0,48	0,96	11,5
Grave-laitier prébrayé (activation calcique ou sulfatique *)	2	0,50	1	12,0
Grave-cendres volantes silico-alumineuses-chaux	1,8	0,53	0,95	12,8
Bétans compactés et graves hydrauliques à hautes performances	1,8	0,525	0,95	12,6

* nature de l'actif

Le comportement en fatigue des graves-liants spéciaux routiers est couramment assimilé à celui des graves-ciment. L'attention est cependant attirée sur la diversité de ces liants spéciaux et leur constante évolution.

• *Caractéristiques pour le dimensionnement des chaussées*

– Paramètres de calcul tirés de résultats d'essais

A défaut de résultats d'essais de fatigue en flexion, pour déduire les valeurs des paramètres de calcul propres à une formule donnée, **il est souhaitable de disposer des résultats d'une étude complète** (en R_t , E) **sur la formule de base**. Ceci est en effet nécessaire pour appréhender la dispersion probable des résistances sur chantier compte tenu des variations inéluctables de compacité, de teneurs en eau et en liant.

Compte tenu de ces dispersions et de l'écart généralement observé, à âge égal, entre les résultats d'essais sur éprouvettes reconstituées en laboratoire et sur prélèvements dans la chaussée, le dimensionnement ne saurait être effectué à partir des valeurs moyennes obtenues sur la formule de base. On retiendra des valeurs plus faibles rendant compte de la sensibilité de la formule à une variation de ses constituants.

Les valeurs de σ_6 et de module E utilisées dans le calcul de dimensionnement seront déduites des valeurs moyennes à 360 jours obtenues sur la formule de base qui sera la référence pour le chantier, en minorant les résultats de laboratoire de :

- 30 % pour la résistance en traction R_{t360} ,
- 10 % pour le module E_{360} ¹.

Ceci conduit aux relations :

$$\sigma_6 = 0,7 \times (\sigma_6/R_t) \times R_{t360}$$

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

la valeur du rapport (σ_6/R_t) étant celle donnée par le tableau V.4.2.

1. La plus faible minoration affectée au module résulte d'une démarche de sécurité du point de vue du dimensionnement.

— Valeurs de référence pour les paramètres de calcul

Le tableau V.4.3. présente des valeurs des paramètres de calcul pouvant être retenues comme référence pour des graves traitées dont la composition et la réalisation sont conformes aux normes.

Tableau V.4.3. – Valeurs de référence des paramètres de calcul pour des graves traitées aux liants hydrauliques conformes aux normes

Matériau	E (10 ³ MPa)	σ_6 (MPa)	- 1/b	SN	R ₁₃₆₀ min (MPa)
Grave-ciment					
Grave-liants routiers	23	0,75	15	1	1,2
Grave-cendres hydrauliques					1,15
Grave-laitier granulé					
Grave-laitier prébroyé (chaux *)	15	0,60	12,5	1	0,9
Grave-laitier prébroyé (activant sulfatique au calcique *)	20	0,70	13,7	1	1
Grave-cendres valantes silica-alumineuses-chaux	30	1,40	16	1	2,1
Bétans compactés	28	1,85	15	1	2,8

* nature de l'activant

Avertissement : les valeurs indiquées pour les graves-laitier correspondent à des résultats obtenus avec des laitiers de fraîche production issus de minerai de fer de Lorraine. Dans le cas du réemploi de produits mis en dépôt, une étude spécifique est à réaliser. Le changement de nature de minerai pourrait aussi amener à reconsidérer les valeurs données aux caractéristiques des graves-laitier.

Ces valeurs proviennent d'une large enquête. Elles ont été choisies vers le bas des fuseaux de caractéristiques observées. Elles doivent être considérées comme indicatives en raison du large spectre de valeurs qui peut être obtenu selon la formule et la nature de l'activant retenues. La dernière colonne porte les valeurs minimales correspondantes de R₁₃₆₀ à obtenir sur la formule de base.

Afin de limiter l'amplitude de la fissuration de retrait et ses incidences sur l'intégrité de la couverture bitumineuse, la directive de 1983 introduisait une borne supérieure sur le module E₃₆₀ (tableau V.4.4.). Cette recommandation reste valable même si l'assise est préfissurée à la mise en œuvre.

Tableau V.4.4.

Recommandations de la directive de 1983 pour le module des graves traitées aux liants hydrauliques

Matériau	E ₃₆₀ (10 ³ MPa)
Grave-laitier	≤ 20
Grave-pauzzolanes chaux	≤ 25
Grave-laitier prébroyé	≤ 25
Grave-ciments normalisés	≤ 40
Grave-liants spéciaux routiers	≤ 40
Grave-cendres hydrauliques	≤ 40
Grave-cendres valantes-chaux	≤ 45

Pour la plupart des chantiers, les délais d'étude sont très inférieurs à un an, ce qui conduit à apprécier les performances à un an à partir d'essais réalisés à 28, 60 ou 90 jours suivant les liants. Le tableau V.4.5. donne des valeurs indicatives de coefficients de correspondance, étant entendu que **des écarts importants peuvent être observés par rapport à ces valeurs.**

Tableau V.4.5. – Valeurs indicatives de coefficients de correspondance pour l'estimation des performances mécaniques à un an des graves traitées

Matériau	Age (jours)	R_{tj}/R_{t360}	E_j/E_{360}
Grave-laitier	90	0,70	0,70
Grave-ciment normalisé	28	0,60	0,65
Grave-liants spéciaux routiers	60	0,65	0,70
Grave-cendres hydrauliques	60	0,60	0,65
Grave-cendres volantes-chaux	90	0,65	0,75
Grave-pauzzalanes-chaux	90	0,50	0,50

4.3. SABLES TRAITÉS AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Les sables traités aux liants hydrauliques considérés ici sont des mélanges de sable, le cas échéant d'un correcteur granulométrique, d'un liant hydraulique et d'eau, fabriqués en centrale de malaxage, en des proportions définies. Le cas de sables traités en place est abordé à la fin de ce chapitre.

Les sables traités aux liants hydrauliques employés en matériau d'assise sont codifiés dans la norme NF P 98-113. Les prescriptions d'usage, de fabrication et de mise en œuvre sont définies pour les routes du réseau national dans la directive de la Direction des routes pour la *Réalisation des assises de chaussées en sables traités aux liants hydrauliques* (février 1985) [29]. Ce document complète, pour les aspects propres aux sables, la directive de 1983 sur les graves traitées déjà citée [28].

Ces sables peuvent être des sables naturels ou provenir d'un processus d'élaboration de granulats. L'étude de formulation vise, dans le cas des sables, à définir et optimiser le traitement en fonction de leurs caractéristiques initiales pour permettre leur emploi en assise de chaussée.

4.3.1. Description des sables faite par la norme

Les différentes catégories de sables traités sont définies en fonction de leurs caractéristiques physiques et mécaniques ainsi que de la nature du liant.

- *Spécifications se rapportant aux constituants*

- Sables

Les sables sont classés selon leur granularité et leur propreté.

- Matériaux correcteurs

La granularité et l'angularité du sable de base peuvent ne pas lui assurer des caractéristiques suffisantes de stabilité immédiate ou de résistance mécanique à long terme; l'amélioration est faite alors par l'apport de matériaux de granularité complémentaire : granulats, fines.

– Lients hydrauliques

Les dispositions sont les mêmes que celles définies pour les graves traitées.

• Spécifications se rapportant aux mélanges

– Compacité

La composition granulométrique doit conduire à une formule de base dont la densité est au moins égale à 97% de la densité à l'optimum Proctor modifié.

– Dosage en liant

Le choix du dosage résulte de l'étude de formulation, les intervalles habituels de dosage en liant de la formule de base pour les sables traités s'avèrent supérieurs à ceux des graves.

• Spécifications sur le comportement mécanique

Deux aspects du comportement mécanique des sables traités sont pris en considération :

- la stabilité immédiate,
- les performances mécaniques à long terme.

– Stabilité immédiate

La stabilité immédiate caractérise l'optitude du matériau :

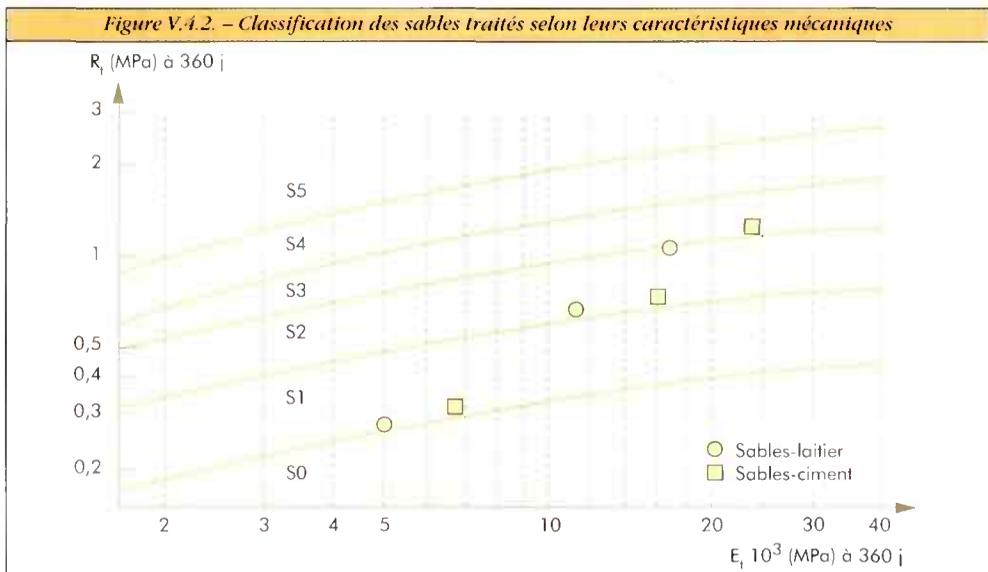
- à permettre la circulation des engins de chantier pour assurer la mise en œuvre et le compactage,
- à éviter la déformation de la surface de la couche traitée au jeune âge sous le trafic de chantier.

La stabilité immédiate des sables traités est appréciée par l'Indice de portance immédiate IPI (NF P 98-231-4).

Trois classes de stabilité immédiate sont définies par la même norme NF P 98-113 : $IPI \leq 25$; $25 < IPI \leq 50$; $IPI > 50$.

– Performances mécaniques à long terme

Les sables traités sont caractérisés à partir des valeurs de résistance en traction directe R_t et de module sécant à 30% de la charge de rupture E , à 360 jours. Les classes de performances mécaniques sont définies dans le diagramme (R_t, E) reproduit par la figure V.4.2.



4.3.2. Exigences relatives à l'emploi

En complément des indications de portée générale données en V.1.3., quelques éléments propres aux sables traités sont indiqués pour guider le choix de ces exigences.

- **Propreté des sables**

En assise, seule l'utilisation de sables propres ou légèrement pollués (VBS au plus égale à 0,4) est à envisager.

- **Stabilité immédiate**

Pour les chaussées à moyen et fort trafic, l'objectif d'une valeur d'IPI au moins égale à 50 est souhaitable. Lorsque :

- l'IPI est inférieure à 25, le matériau s'avère trop instable,
- la valeur d'IPI est comprise entre 25 et 50, le comportement est très variable selon les conditions de mise en œuvre.

Pour les chaussées à faible trafic, on pourra admettre des exigences quelques peu réduites en ce qui concerne la fondation avec une valeur moyenne d'IPI d'au moins 35.

- **Performances mécaniques**

Les matériaux de classe inférieure à S1 ne sont pas utilisables en couche d'assise.



4.3.3. Spécifications relatives à la mise en œuvre

L'épaisseur de sable traité mise en œuvre en une couche peut varier de 18 à 45 cm (et quelquefois moins pour certains usages spéciaux).

Afin d'éliminer la partie superficielle feuilletée par le compactage et pour améliorer l'uni, la couche de base est mise en œuvre avec une épaisseur excédentaire compactée de 2 à 3 cm qui est enlevée ensuite.

Le maintien de la teneur en eau pendant la phase de prise et la protection superficielle de l'assise en sable traité doivent être assurés par un enduit¹ avec, le cas échéant, un cloutage préalable des sables fins au moyens.

4.3.4. Performances mécaniques pour le dimensionnement

- **Comportement en fatigue**

Dans les études courantes, le comportement en fatigue est estimé à partir d'essais de traction directe par le biais de corrélations entre :

¹. Lorsque le sable traité est recouvert d'une couche de matériau traité aux liants hydrauliques mise en œuvre rapidement après le sable traité, il ne doit pas y avoir de couche bitumineuse afin qu'il y ait collage des couches. En revanche, il faut maintenir l'humidité du sable traité par arrosage.

- la résistance en flexion f_f et la résistance en traction simple R_t ,
- la contrainte de rupture pour un million de chargements σ_6 et f_f .

Le tableau V.4.6. présente des valeurs moyennes pour les rapports f_f/R_t et σ_6/f_f , ainsi que les valeurs de σ_6/R_t , et de la pente $-1/\beta$ qui en découlent.

Tableau V.4.6.
Valeurs indicatives des caractéristiques en fatigue de sables traités aux liants hydrauliques

Matériau	f_f/R_t	σ_6/f_f	σ_6/R_t	$-1/\beta$
Sable-laitier au pouzzolanes-chaux	2	0,42	0,85	10,4
Sable-ciment ou cendres volantes-chaux, au cendres hydrauliques, au liant spécial	2	0,46	0,93	11,2

• *Caractéristiques pour le dimensionnement des chaussées*

- Poromètres de calcul tirés des résultats d'essais

Du fait de la diversité d'origine des sables et de la variété de composition et de dosage en liant résultent des considérations de stabilité immédiate et de performances mécaniques à long terme, il est nécessaire à chaque fois d'effectuer une étude de laboratoire spécifique (NF P 98-114-2).

L'étude doit permettre de préciser la sensibilité de la formule de base aux dispersions (composition et mise en œuvre) inévitables sur chantier.

Comme pour les graves traitées, le dimensionnement ne saurait être effectué à partir des valeurs moyennes obtenues en laboratoire sur la formule de base. On retiendra des valeurs plus faibles tenant compte de la sensibilité de la formule à une variation de ses constituants. Une réduction de 25% appliquée aux valeurs de module et de résistance obtenues sur la formule de base semble être un ordre de grandeur assez représentatif.

Les valeurs de σ_6 et de module E utilisées dans le calcul de dimensionnement seront déduites des valeurs moyennes à 360 jours obtenues sur la formule de base par les relations :

$$\sigma_6 = 0,75 \times (\sigma_6/R_t) \times R_{t360}$$

$$E = 0,75 E_{360}$$

la valeur du rapport (σ_6/R_t) étant celle donnée par le tableau V.4.6.

Le dimensionnement étant fait sur la base des caractéristiques à 360 jours alors que les valeurs de R_t et de E sont souvent obtenues à 90 ou 180 jours, à défaut de résultats spécifiques on pourra retenir les relations de correspondance suivantes :

$$\text{sable-laitier } E_{180}/E_{360} = R_{t180}/R_{t360} = 0,85$$

$$\text{sable-ciment } E_{90}/E_{360} = R_{t90}/R_{t360} = 0,93$$

- Valeurs de référence pour les paramètres de calcul

Pour les classes de résistance définies par l'abaque de la figure V.4.2., les valeurs des paramètres de calcul à retenir pour le dimensionnement sont précisées dans le tableau V.4.7.

Tableau V.4.7. – Valeurs des paramètres de calcul pour des sables traités aux liants hydrauliques conformes à la norme NF P 98-113 et aux directives

Matériau	Classe	E (10 ³ MPa)	σ_6 (MPa)	-1/b	SN
sable-laitier ou pouzzalanes-chaux	S3	12,5	0,65	10	0,8
	S2	8,5	0,425		
	S1	3,7	0,175		
sable-ciment ou cendres volantes-chaux, ou cendres hydrauliques, ou liant spécial routier	S3	17,2	0,75	12	0,8
	S2	12	0,50		
	S1	5	0,21		

Les valeurs données par le tableau V.4.7. correspondent aux points du diagramme (R_f , E) à 360 jours, définis dans le tableau V.4.8. Ces points repérés également sur la figure V.4.2. sont situés à peu près en limite de zone ¹.

Tableau V.4.8. – Valeurs de référence pour les classes de sables traités aux liants hydrauliques conformes aux directives

Classe	sable-laitier		sable-ciment	
	E ₃₆₀ (10 ³ MPa)	R _{f360} (MPa)	E ₃₆₀ (10 ³ MPa)	R _{f360} (MPa)
S3	16,7	1,0	23,0	1,1
S2	11,3	0,67	16,0	0,7
S1	5,0	0,27	6,7	0,3

4.3.5. Cas des sables traités en place

L'emploi de sables traités en place en couche de fondation peut être considéré pour des chaussées à faible et moyen trafic dans le cas d'une plate-forme en sable. L'étude de formulation devra tenir compte des surdosages nécessaires pour compenser les dispersions prévisibles en place.

Pour couvrir les dispersions inévitables (en particulier hétérogénéité de nature du sable et de teneur en eau), le dimensionnement sera effectué :

- pour les matériaux situés en classe S2 et supérieure (fig. V.4.2.) à partir des résultats d'essais de laboratoire sur la formule de base avec des échantillons représentatifs reconstitués, en retenant les caractéristiques mécaniques de la classe de performance inférieure (tableau V.4.8.) ;
- pour les matériaux situés en classe S1 à partir des résultats d'essais sur éprouvettes reconstituées, en majorant l'épaisseur donnée par le calcul de 5 cm ;

étant entendu que toutes les précautions sont prises pour le choix des matériels, des méthodes d'exécution et de contrôle afin d'assurer la régularité de l'épandage du liant et du malaxage.

1. Ce décaupage est voisin de celui défini pour les classes de sable traité du Catalogue 77,

avec la correspondance approchée suivante :

A – limite basse de classe S1,

B – milieu de classe S1,

C – limite entre classes S1 et S2,

D – limite entre classes S2 et S3.

5. LES MATÉRIAUX TRAITÉS AUX LIANTS HYDROCARBONÉS A CHAUD

Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés à chaud, bétons et enrobés bitumineux, graves et sables bitume, sont des mélanges de granulats et de liant hydrocarboné avec éventuellement des additifs, dosés, chauffés et malaxés en centrale. Ces techniques ont été codifiées depuis 1972 dans différents documents. La plupart d'entre elles se trouvent maintenant décrites dans des normes AFNOR de la série NF P 98-130 à 150. Chaque norme de produit traite de la définition, de la classification, des caractéristiques et des particularités de fabrication et de mise en œuvre.

La norme NF P 98-150 *Enrobés hydrocarbonés, exécution des corps de chaussée, couches de liaison et de roulement* s'applique à l'ensemble de ces techniques à chaud.

Pour le réseau routier national, des spécifications et prescriptions complémentaires aux normes sont définies dans un document de la Direction des routes de 1994 pour les *Couches d'assises et de surface en enrobés hydrocarbonés à chaud* [32]. Ce document se substitue aux anciennes directives. On trouvera en annexe l'indication d'autres documents de recommandations antérieurs [21], [24].

Certaines spécifications d'usage figurent également dans les avis techniques de produits d'entreprise.

Les paragraphes qui suivent décrivent les éléments communs aux différents matériaux traités aux liants hydrocarbonés à chaud, avant de définir les caractéristiques propres à chaque technique et utiles du point de vue du dimensionnement. On examine successivement les matériaux normalisés suivants :

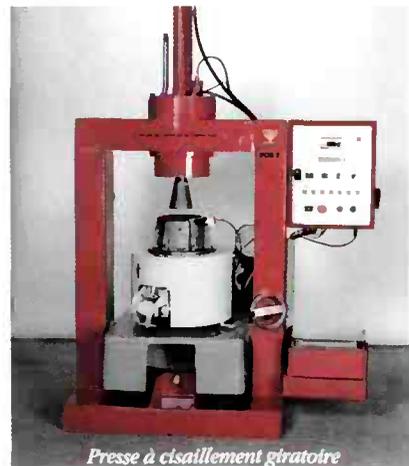
- les graves-bitume (paragraphe 5.2.),
 - les enrobés à module élevé (paragraphe 5.3.),
 - les divers bétons bitumineux (paragraphe 5.4.),
- ainsi que les sables-bitume (paragraphe 5.5.) et les enrobés recyclés à chaud (paragraphe 5.6.) qui ne sont pas couverts par une norme de produit.

D'autres techniques hydrocarbonées à chaud non normalisées sont employées en couche de roulement ou en couche anti-fissure (bétons bitumineux ultra-mince ou BBUM, sables enrobés cloutés, enrobés anti-fissures...) mais ne sont pas décrites dans ce guide.

5.1. ELEMENTS COMMUNS AUX DIFFERENTS MATERIAUX TRAITES AUX LIANTS HYDROCARBONÉS À CHAUD NORMALISÉS

5.1.1. Spécifications sur les performances du mélange

La méthodologie d'étude en laboratoire s'appuie sur la presse à cisaillement giratoire (NF P 98-252), l'essai Duriez (NF P 98-251-1), le cas échéant l'essai d'arnié-rage (NF P 98-253-1) et les essais de module et de fatigue auxquels il est fait référence plus loin.



5.1.2. Performances mécaniques pour le dimensionnement

Les données nécessaires au dimensionnement sont déduites de résultats d'essais de laboratoire normalisés, effectués dans des conditions bien définies de température et de sollicitation, sur des éprouvettes confectionnées en laboratoire ou éventuellement prélevées en place.

La caractérisation mécanique recherchée porte sur :

- la dépendance du module d'Young vis-à-vis de la température et de la vitesse de chargement,
- le comportement en fatigue.

Ce second aspect n'est pas pris en considération pour les matériaux de couche de roulement très mince (épaisseur inférieure à 3 cm) du fait qu'ils sont sollicités surtout en compression et en cisaillement.

La variation du module d'Young, E , avec la température et la vitesse de chargement est évaluée par les essais de module et de perte de linéarité (NF P 98-260-1) ou de flexion dynamique (NF P 98-260-2).

Le comportement en fatigue est apprécié par l'essai de fatigue en flexion (NF P 98-261-1) pratiqué à 10 °C et 25 Hz. Dans cet essai, l'éprouvette trapézoïdale encastrée à la base est sollicitée en tête par un déplacement sinusoïdal d'amplitude constante, sans période de repos. La rupture conventionnelle correspond au nombre de cycles N pour lequel l'effort, qu'il est nécessaire d'appliquer, est réduit de moitié. La courbe de fatigue est représentée par une relation de la forme :

$$\varepsilon/\varepsilon_\delta = (N/10^6)^b$$

La dispersion sur les résultats (sur $\log N$ à la rupture) est décrite par l'écart-type SN.

Il importe de signaler que cette procédure d'essai ne permet pas d'apprécier la capacité d'autoréparation des différents matériaux et qu'elle peut accuser l'effet de la susceptibilité thermique du liant par rapport au comportement des matériaux en place soumis aux sollicitations du trafic.

Sur une plage assez large de températures positives, la dépendance du module E et de la déformation ε_δ peut être approchée par une relation du type :

$$\varepsilon_\delta(\theta) E(\theta)^n = \text{constante}$$

A défaut de résultats d'essais de fatigue à différentes températures pour un matériau donné, on pourra retenir pour n la valeur moyenne de 0,5.

5.1.3. Exigences relatives à l'emploi

En matière de granulats, les exigences de dureté sont d'autant plus sévères que le trafic est élevé et que la couche est proche de la surface. L'angularité a beaucoup d'incidence sur la tenue à l'arniérage du matériau. Ce point doit être surveillé pour les trafics élevés et les situations particulières (trafic lourd lent, canalisé, climat chaud...).

La sévérité des sollicitations orientera également le choix du grade de liant et l'emploi ou non de liants modifiés.

5.2. LES GRAVES-BITUME

Les graves-bitume, définies par la norme NF P 98-138, sont des enrobés bitumineux utilisés en couche de base ou de fondation.

5.2.1. Description faite par la norme

Les graves-bitume sont rangées en trois classes de performance, et en deux catégories selon leur granularité (0/14 ou 0/20) :

- la classe 1 s'apparente aux matériaux définis dans la directive de 1972 (3,5 % de bitume pour une GB 0/20),
- la classe 2 avec une teneur en liant moyenne (4,2 % pour une GB 0/14),
- la classe 3 avec une teneur en liant plus élevée pour améliorer la tenue en fatigue (4,5 % pour une GB 0/14).

- *Spécifications se rapportant aux constituants*

Les graves-bitume sont définies par leur classe de granulats et la nature du liant.

Le liant est un bitume pur ou modifié, en général d'un grade 35/50 voire 50/70, la norme n'excluant pas l'utilisation d'autres grades.

- *Spécifications se rapportant aux mélanges*

Pour les graves-bitume 0/14 et 0/20, une courbe de granularité est indiquée comme point de départ de l'étude de formulation. Une courbe discontinue est possible.

Une teneur en liant minimale est définie à partir du module de richesse pour chaque type de grave-bitume (tableau V.5.1).

Tableau V.5.1 – Teneur en liant minimale des trois classes de graves-bitume normalisées

Classe	Module de richesse	(Teneur en liant *)
1	2,0	(3,4% GB 0/20)
2	2,5	(4,2% GB 0/14)
3	2,8	(4,5% GB 0/14)

* Valeur moyenne de la teneur en % pour une masse volumique des granulats de $2,65 \text{ g/cm}^3$

5.2.2. Exigences relatives à l'emploi

La teneur en liant réduite des graves-bitume de classe 1 conduit à un enrobage imparfait et une sensibilité certaine à l'eau.

Une grave-bitume 0/14 exige une teneur en liant supérieure à celle d'une grave-bitume 0/20.

Une augmentation de la teneur en liant s'accompagne d'une faible augmentation du module mais d'une amélioration sensible de la tenue en fatigue (ϵ_6). Pour cette raison, il est intéressant d'utiliser une grave-bitume de type 3 en couche de fondation dans des structures entièrement bitumineuses ainsi que dans les chaussées à structure inverse.

5.2.3. Spécifications relatives à la mise en œuvre

Les épaisseurs de mise en œuvre des couches sont entre :

- 8 et 12 cm pour les GB 0/14,
- 10 et 15 cm pour les GB 0/20,

les fortes épaisseurs rendant plus difficile l'obtention d'un uni satisfaisant.

La résistance mécanique étant très liée au pourcentage de vides du matériau, des valeurs maximales sont fixées (tableau V.5.2). Elles doivent être vérifiées lors de la réalisation de la planche de référence ou de vérification.

Tableau V.5.2
Pourcentage de vide maximal pour les graves-bitume

Classe	1	2	3
Pourcentage de vide maximal	≤ 13%	≤ 11%	≤ 10%

5.2.4. Performances mécaniques pour le dimensionnement

La norme fixe des valeurs minimales de module E (à 15 °C et 10 Hz) et de déformation ϵ_6 (à 10 °C et 25 Hz) pour les graves-bitume de type 2 et 3.

A défaut de résultats d'essais obtenus sur le matériau considéré, on retiendra pour les calculs de dimensionnement les valeurs données par les tableaux :

- V.5.3. pour le module et ϵ_6 ,
- V.5.4. pour ce qui concerne l'influence de la température sur le module,
- V.5.5. pour la pente, b_1 , de la courbe de fatigue et l'écart-type SN sur logN.

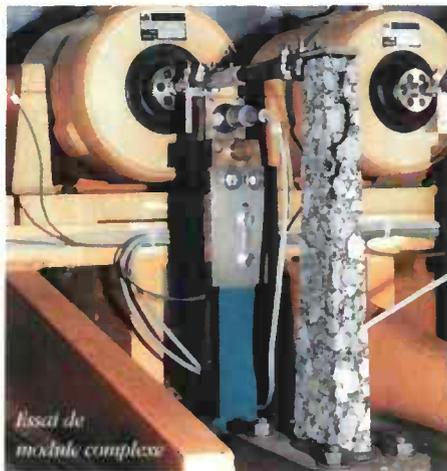


Tableau V.5.3
Caractéristiques mécaniques minimales pour les graves-bitume

Classe	1	2	3
Module (MPa)	7 000*	9 000	9 000
ϵ_6 (10^{-6})	70*	80	90

* Valeurs indicatives non spécifiées par la norme pour les graves-bitume de classe 1

Tableau V.5.4

Valeurs indicatives sur l'incidence de la température sur le module des graves-bitume

Température (°C)	Module à 10 Hz (MPa)					
	-10	0	10	20	30	40
Grave-bitume 1	18 000	14 000	9 000	5 000	2 000	800
Graves-bitume 2 & 3	23 000	18 800	12 300	6 300	2 700	1 000

Tableau V.5.5

Caractéristiques en fatigue pour les graves-bitume

	- 1/b	SN
Grave-bitume 1	5	0,4
Graves-bitume 2 & 3	5	0,3

Dans le cas où l'on observe sur chantier que la grave-bitume a été mise en œuvre avec une compacité ou une teneur en liant différant quelque peu de celles retenues au projet, la vérification de la structure est à faire en adaptant en conséquence les valeurs de module E et de déformation ϵ_6 . A défaut d'autres références on pourra retenir les corrections données dans le tableau V.5.6 établies pour des graves-bitume en granulats 0/14 de LA NOUBLEAU et avec des bitumes 60/70.

Tableau V.5.6

Incidence d'une variation de teneur en liant et de compacité sur E et ϵ_6 d'une grave-bitume

Incidence d'une variation de compacité ΔC à teneur en liant TL constante	Incidence d'une variation de teneur en liant $\Delta(TL)$ pour une compacité constante C_{80} *
$\Delta E = (2\ 000 - 310\ TL)\ \Delta C$	$\Delta E = (18\ 000 - 3\ 700\ TL)\ \Delta(TL)$
$\Delta(\epsilon_6) = 3,3\ \Delta C$	$\Delta(\epsilon_6) = (72 - 10\ TL)\ \Delta(TL)$

(*) C_{80} compacité obtenue pour 80 rotations à la presse à cisaillement giratoire, correspondant à un compactage "moyen".

Avec : E en MPa, ΔC écart de compacité en %, ϵ_6 en 10^{-6} , TL teneur en liant (pour une masse volumique des granulats de 2,85 g/cm³; dans les autres cas la valeur de TL dans ces relations doit être corrigée dans le rapport 2,85/ ρ_s).

5.3. LES ENROBÉS À MODULE ÉLEVÉ

Les enrobés à module élevé (EME) sont des enrobés bitumineux définis par la norme NF P 98-140, utilisés en couche de liaison, de base ou de fondation.

5.3.1. Description faite par la norme

La norme distingue deux classes de performance pour les EME dont la granularité peut être 0/10, 0/14 et 0/20.

- Spécifications se rapportant aux constituants

Les critères de choix des granulats sont les mêmes que ceux des graves-bitume.

Le liant est un bitume pur ou contenant des additifs, non normalisé, choisi pour atteindre les performances fixées par la norme.

- Spécifications se rapportent aux mélanges

La norme ne spécifie pas de courbe granulométrique.

Une teneur en liant minimale est définie à partir du module de richesse pour chaque classe d'EME (tableau V.5.7.).

*Tableau V.5.7.
Teneurs en liant minimales des deux classes d'EME normalisés*

Classe	Module de richesse	(Teneur en liant *)
1	2,5	(4,2%)
2	3,4	(5,6%)

* Valeur moyenne de teneur en liant en % pour une masse volumique des granulats de 2,65 g/cm³

5.3.2. Exigences relatives à l'emploi

Les caractéristiques mécaniques du liant ont une part prépondérante dans le comportement mécanique des enrobés à module élevé. Les bitumes, parfois modifiés, sont d'un grade dur (pénétrabilité comprise entre 5 et 35 /10 mm). Ils ne sont pas normalisés ; il n'y a donc pas de spécification concernant le durcissement à l'enrobage, le vieillissement, le comportement à froid, ni sur la composition chimique. Le choix du liant doit ainsi résulter de l'étude de formulation.

Les EME de classe 2, de par leurs caractéristiques, seront plutôt employés dans les couches sollicitées en fatigue.

5.3.3. Spécifications relatives à la mise en œuvre

Les épaisseurs de mise en œuvre des couches sont entre :

- 6 et 10 cm pour les EME 0/10,
- 7 et 12 cm pour les EME 0/14,
- 10 et 15 cm pour les EME 0/20.

Une valeur maximale de pourcentage de vides du matériau (tableau V.5.8.), à obtenir sur la planche de référence ou de vérification, est fixée pour chaque classe d'EME.

*Tableau V.5.8.
Pourcentage de vide maximal pour les EME*

Classe	1	2
Pourcentage de vide maximal	≤ 10 %	≤ 6 %

5.3.4. Performances mécaniques pour le dimensionnement

La norme fixe des valeurs minimales de module E (à 15 °C et 10 Hz) et de déformation ε_6 (à 10 °C et 25 Hz).

A défaut de résultats d'essais obtenus sur le matériau considéré, on retiendra pour les calculs de dimensionnement les valeurs données par les tableaux :

- V.5.9. pour le module et ε_6 ,
- V.5.10. pour ce qui concerne l'influence de la température sur le module,
- V.5.11. pour la pente, b , de la courbe de fatigue et l'écart-type SN sur logN.

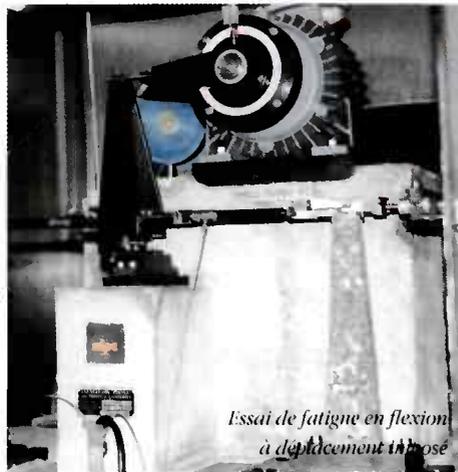


Tableau V.5.9.
Caractéristiques minimales pour les EME

Classe	1	2
Module (MPa) 15 °C – 10 Hz	14 000	14 000
ε_6 (10^{-6})	100	130

Tableau V.5.10.
Valeurs indicatives sur l'incidence de la température sur le module des EME

Température (°C)	Module à 10 Hz (MPa)					
	-10	0	10	20	30	40
EME classe 1 et 2	30 000	24 000	17 000	11 000	6 000	3 000

Tableau V.5.11.
Caractéristiques en fatigue des EME

	- 1/b	SN
EME classe 1	5	0,30
EME classe 2	5	0,25

5.4. LES DIVERS BETONS BITUMINEUX ET AUTRES ENROBÉS À CHAUD NORMALISÉS

Cette partie regroupe différentes techniques d'enrobés bitumineux à chaud utilisables en couche de surface (couche de roulement et couche de liaison).

Les teneurs en liant minimales, exprimées par le module de richesse, quand elles sont fixées par les normes pour ces différents matériaux, sont données dans le tableau V.5.12.

Tableau V.5.12
Divers bétons bitumineux et autres enrobés à chaud normalisés

Matériau	Norme	Classe ou type	Granularité	Module de richesse minimal	Épaisseur moyenne (cm)
BB semi-grenus BBSG	NF P 98-130	-	0/10 0/14	3,5 3,3	6 à 7 7 à 9
BB minces BBM	NF P 98-132	BBM a à d selon la granularité Classe 1 à 3 selon résultats à l'arrière	0/10 0/14	3,6 3,3	3 à 4 3,5 à 5
BB cloutés BBC	NF P 98-133		-	0/6,3 0/10	3,8 3,6
BB drainants BBDr	NF P 98-134	-	0/10 et 0/14 0/6,3	-	4 3
BB pour chaussée souple à faible trafic BBS	NF P 98-136	type 1	0/10 disc. 2/6,3	3,4	4 à 5
		type 2	0/10	3,7	4 à 6
		type 3	0/10	3,4	8
		type 4	0/10	3,1	10 à 12
BB très minces BBTM	NF P 98-137	-	type 1 ou 2 selon résultats à la PCG	0/10 ou 0/14	2 à 2,5
BB à module élevé BBME	NF P 98-141	classe 1 à 3	0/10 0/14	-	6 à 7 7 à 9
			0/14	-	3,5 à 4
Asphaltes caulés	NF P 98-145	-	0/10 0/6	-	2,5 à 3,5 2 à 2,5

Les seuls autres aspects considérés ici sont les conditions d'emploi et les performances mécaniques pour le dimensionnement.

5.4.1. Spécifications relatives à la mise en œuvre

Les épaisseurs moyennes d'utilisation pour ces différents matériaux sont mentionnées dans le tableau V.5.12.

5.4.2. Performances mécaniques pour le dimensionnement

Les normes fixent des valeurs minimales de module E (à 15 °C et 10 Hz) et de déformation (à 10 °C et 25 Hz).

Pour les calculs de dimensionnement, à défaut de résultats d'étude spécifiques, on retiendra les



valeurs données par le tableau V.5.13. pour E et ε_6 et par le tableau V.5.14. pour la pente de la courbe de fatigue b et l'écart-type SN sur $\log N$.

Tableau V.5.13.
Module et déformation ε_6 pour les divers bétons bitumineux

Matériau	E (MPa)		ε_6 (10^{-6})
	15 °C – 10 Hz		10 °C – 25 Hz
BBSG	5 400		100
BBM	5 400		100
BBC	5 000		100
BBME	classe 1	9 000	110
	classe 2	12 000	100
	classe 3	12 000	100

Tableau V.5.14.
Caractéristiques en fatigue pour les divers bétons bitumineux

-1/b	SN
5	0,25

Dans le cas des bétons bitumineux semi-grenus (NF P 98-130) élaborés avec un bitume 50/70, l'influence de la température sur le module peut être décrite par les valeurs données par le tableau V.5.15.

Tableau V.5.15.
Influence de la température sur le module d'un BBSG

Température (°C)	-10	0	10	20	30	40
Module à 10 Hz (MPa)	14 800	12 000	7 200	3 600	1 300	1 000

Pour les enrobés bitumineux mis en œuvre en une couche d'épaisseur inférieure à 3 cm, on utilise les valeurs de module des bétons bitumineux semi-grenus.

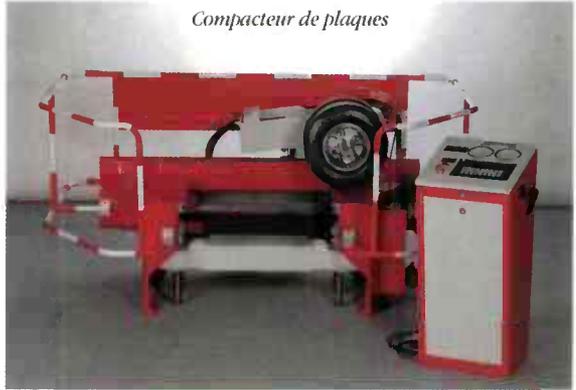
Dans le cas des bétons bitumineux drainants, à défaut de résultats issus d'une étude spécifique, on retiendra comme valeur de référence 3 000 MPa pour le module en flexion à 15 °C et 10 Hz.

Comme pour les autres matériaux traités aux liants hydrocarbonés à chaud, les résultats d'essais de fatigue à déplacement imposé sans temps de repos ne rendent pas compte des possibles différences de comportement associées aux phénomènes d'autoréparation.

Malaxeur



Compacteur de plaques



Banc gamma d'auscultation



5.5. LES SABLES-BITUME

Sous l'appellation non normalisée de sables-bitume sont regroupées des formules utilisant des sables d'origines diverses, de granulométrie variée et donc de performances très inégales. Des éléments de codification sont donnés dans la directive de 1972 de la Direction des routes sur les graves et sables-bitume [21].

5.5.1. Description et classification

Les sables-bitume ont un D inférieur à 6 mm. On distingue les sables :

- grossiers (refus à 2 mm > 20 %),
- moyens (refus à 2 mm < 20 % et refus à 0,5 mm > 25 %),
- fins (refus à 0,5 mm < 25 %).

On les classe en 4 catégories notées A, B, C et D, selon les valeurs de résistance R de l'essai Duriez (tableau V.5.16.).

Tableau V.5.16.
Classification des sables-bitume selon l'essai Duriez à 18°C

Type de sable	A	B	C	D
R (MPa)	< 2	$2 \leq R < 4$	$4 \leq R < 6$	≥ 6
r/R			> 0,50	

5.5.2. Spécifications se rapportant aux constituants

Le liant est un bitume dur de classe 20/30 (parfois 35/50 si l'indice de concassage du sable est suffisant) à raison de 3 à 4 %, afin d'avoir une rigidité et une stabilité mécanique convenables.

Si la teneur en fines naturelles du sable n'atteint pas une valeur de l'ordre de 5 % du mélange, il faut incorporer des fines d'apport.

5.5.3. Exigences relatives à l'emploi

Du fait de leurs performances moyennes et dispersées, l'emploi de sables-bitume est limité au cas de couches de fondation, sauf pour les chaussées à faible trafic où leur emploi en couche de base est envisageable.

5.5.4. Performances mécaniques pour le dimensionnement

Celles-ci sont à préciser par une étude de laboratoire, au cas par cas selon les matériaux.

Eprouvette de sable-bitume



5.6. LES ENROBÉS RECYCLÉS À CHAUD

Un enrobé recyclé est un mélange d'agrégats anciens avec un ou plusieurs éléments correcteurs : liant, enrobé, granulats. Les caractéristiques des matériaux à recycler et recyclés doivent être précisées par référence aux techniques et à leurs objectifs que l'on décrit ci-après. Ceci justifie la forme particulière donnée à ce chapitre.

5.6.1. Objectifs des techniques de recyclage des enrobés

Quatre objectifs peuvent être pris en considération :

- reconstituer un enrobé proche de l'enrobé initial (vieillessement du liant),
- améliorer l'enrobé existant pour le rendre mieux adapté aux conditions d'usage (par exemple évolution du trafic),
- fabriquer et mettre en œuvre un nouvel enrobé, les agrégats de l'enrobé ancien étant utilisés comme apport,
- rétablir le collage de la couche de roulement sur son support en enrobé.

5.6.2 Les différentes techniques de recyclage à chaud

On distingue trois techniques de recyclage en place à chaud et le recyclage en centrale.

• Le thermoreprofilage

La technique consiste en une remise au profil d'une chaussée bitumineuse par chauffage, fractionnement, mise en forme et recompactage, sans enlèvement de matériaux ni apport d'enrobés neufs.

Le thermoreprofilage n'est utilisé seul que dans le cas où l'enrobé en place ne présente que de légers défauts liés à la formulation initiale ou à son évolution dans le temps. Il peut également être utilisé pour un reprofilage préalable du support, avant la mise en œuvre d'une couche d'enrobés.

L'épaisseur traitée est de 2 à 3 cm pour corriger de légers défauts de surface et plus si les déformations transversales sont importantes.

• La thermorégénération

Cette technique consiste en une remise au profil d'une chaussée bitumineuse (avec, en général, enlèvement partiel de matériaux) par chauffage, fractionnement, réglage, mise en place d'une couche d'enrobés neufs et compactage de l'ensemble.

La thermorégénération est utilisée dans différentes situations pour redonner à une chaussée un peu vieillie un profil en travers satisfaisant, restituer l'imperméabilité, l'uni et la rugosité à une surface glissante ou usée, supprimer les microfissures, ou remédier à des orrachements. Elle peut également s'étendre à la mise en œuvre de tapis sur des supports nécessitant un reprofilage préalable.

L'épaisseur traitée est en général de 3 à 4 cm.

• Le thermorecyclage

La technique consiste en un traitement en place d'une chaussée bitumineuse par chauffage, fractionnement, malaxage de l'enrobé ancien avec les correctifs nécessaires (enrobé, granulats et liant de régénération), remise en œuvre du mélange obtenu au profil souhaité et compactage.

Ce procédé peut être employé pour résoudre certains défauts de formulation ou de vieillissement du liant de l'enrobé en place.

L'épaisseur traitée est en général de 4 à 8 cm.

- **Recyclage en centrale**

Selon le taux de fraisats utilisés, on distingue trois types d'enrobés recyclés en centrale :

- à faible taux (moins de 20 %),
- à taux moyen (de 20 à 40 %),
- à fort taux (au-delà de 40 %).

5.6.3. Caractéristiques des constituants

Pour les agrégats à recycler et les liants de régénération à utiliser, la norme NF P 98-150 indique les modalités à suivre selon l'origine des fraisats, le procédé de recyclage adapté et la fonction de l'enrobé recyclé dans la nouvelle structure de la chaussée : couche de roulement, de liaison ou d'assise.

Les dispositions des paragraphes des normes relatifs aux caractéristiques des constituants des enrobés neufs sont applicables aux enrobés recyclés.

5.6.4. Spécifications se rapportant aux mélanges

Dans le cas du recyclage en centrale à chaud, les prescriptions relatives aux mélanges sont celles de la norme NF P 98-150. L'article 15 du même document donne la définition, les principes, fonctions et modalités d'exécution des techniques de thermoreprofilage, de thermarégénération et de recyclage en place, à chaud ou à froid.

Les apports nécessaires en granulats correcteurs, enrobés neufs et liant de régénération sont à définir par une étude préalable adaptée à l'enrobé à recycler.

5.6.5. Performances mécaniques pour le dimensionnement

Les caractéristiques mécaniques à préciser sont le module et la tenue en fatigue lorsque le matériau est susceptible de travailler en traction ; c'est le cas avec le thermarecyclage en forte épaisseur (6 à 8 cm) et des matériaux d'assise traités en centrale.

- **Thermarecyclage avec apport (granulats, liant, enrobés)**

La correction apportée vise en général à obtenir les caractéristiques mécaniques d'un enrobé normalisé. Dans ce cas, on retient, pour le dimensionnement, les performances mécaniques de l'enrobé normalisé correspondant.

Dans le cas contraire, on réalise lors de l'étude préalable les essais spécifiques pour déterminer le module et éventuellement les caractéristiques en fatigue de l'enrobé recyclé.

- **Recyclage en centrale à chaud**

Selon le taux de recyclage adapté et le produit final souhaité, on se réfère à l'enrobé normalisé correspondant pour déterminer les paramètres de dimensionnement ou on réalisera une étude spécifique pour les déterminer.

6. LES MATERIAUX TRAITES A L'EMULSION DE BITUME

6.1. LES GRAVES-EMULSION

Les graves-émulsion sont des matériaux utilisables en assise de chaussée, qui ont fait l'objet d'une première codification en 1974 dans la directive de la Direction des routes pour la Réalisation des assises de chaussées en graves-émulsion [22].

L'expérience acquise depuis a conduit à élaborer des matériaux un peu plus riches en fines et en liant ce qui a permis d'améliorer le comportement de cette première génération de graves-émulsion.



6.1.1. Description des matériaux faite par la norme

Les graves-émulsion sont des mélanges codifiés par la norme NF P 98-121. La norme distingue trois types de graves-émulsion qui se différencient par la teneur en liant anhydre. Les graves-émulsion de type 1 sont employées en travaux de reprofilage, celles de type 2 et 3 en couches d'assise.

- *Spécifications se rapportant aux constituants*

Les graves-émulsion sont élaborées à partir d'une émulsion cationique à rupture lente avec un bitume d'un grade 35/50, 50/70, 70/100 ou 180/220

Les qualités recherchées pour les granulats des couches d'assise concernent, comme pour les autres matériaux :

- la dureté des gravillons,
- la granularité et la propreté des sables et gravillons,
- l'angularité.

- *Spécifications se rapportant aux mélanges*

- Granularité des mélanges

Les graves-émulsion ont une granularité continue caractérisée par la dimension maximale des éléments, D, (10, 14 ou 20 mm en couche d'assise et 10 ou 14 en reprofilage).

- Pourcentage de vides

La composition granulométrique doit conduire à un pourcentage de vides à l'essai Duriez inférieur ou égal à 15 % pour le type 2 et 13 % pour le type 3. Pour les graves-émulsion de type 3 des pourcentages de vides maximaux sont spécifiés à 10 et 200 rotations à l'essai à la presse à cisaillement giratoire.

- Teneur en liant anhydre

Le tableau V.6.1. présente la teneur minimale en liant anhydre fixée par la norme.

- Teneur en eau

La teneur en eau doit être ajustée pour atteindre les objectifs de compacité et de tenue à l'eau.

Tableau V.6.1. – Teneur minimale en liant anhydre des graves-émulsion

Type de GE	Teneur en liant
1	4,2
2	3,2
3	2,8

- *Spécifications sur les performances mécaniques*

La performance mécanique retenue dans la norme pour qualifier la grave-émulsion est la résistance en compression, R_c , à l'essai Duriez (NF P 98-251-4). La valeur minimale de R_c dépend du type de grave-émulsion et du grade du bitume.

Le rapport des résistances en compression simple après et sans immersion r/R doit être supérieur à 0,55.

6.1.2. Exigences relatives à l'emploi

Le bilan de compartement des chaussées réalisées en grave-émulsion montre que ce matériau est à réserver aux chaussées à trafic moyen au faible (trafic inférieur à T1).

6.1.3. Spécifications relatives à la mise en œuvre

Compte tenu des difficultés de compactage des graves-émulsion et pour que l'eau du mélange puisse s'évacuer pendant la période de "mûrissement", les graves-émulsion doivent être mises en couche d'épaisseur inférieure à 15 cm.

6.1.4. Performances mécaniques pour le dimensionnement

La teneur en eau, la compacité et par suite les performances mécaniques des graves-émulsion évoluent au jeune âge. Cette évolution en phase dite de mûrissement est importante au cours des six premiers mois et paraît se poursuivre pendant deux à trois ans. Du point de vue mécanique, les graves-émulsion sont des matériaux ayant des caractéristiques intermédiaires entre celles des graves reconstituées humidifiées et des graves-bitume.

Les résultats sur le compartement en fatigue des graves-émulsion sont encore peu nombreux. Pour des chaussées à faible et moyen trafic, l'usage est de justifier le compartement de la structure vis-à-vis du seul critère de déformation verticale du sol support.

- *Caractéristiques pour le dimensionnement des chaussées*

– Données de référence

Au-delà des premiers mois correspondant à la phase de mûrissement, on pourra retenir pour les graves-émulsion conformes à la norme les caractéristiques données par le tableau V.6.2.

Tableau V.6.2. – Caractéristiques mécaniques des graves-émulsion après mûrissement

Type	E (MPa) 15 °C - 10 Hz
Type 1	3 000
Type 2	2 000

7. LE BÉTON DE CIMENT

Ce chapitre ne traite que des bétons denses de ciment mis en place par vibration.

La norme NF P 98-170 *Chaussées en béton de ciment. Exécution, suivi et contrôle. Spécifications* définit les exigences auxquelles doivent satisfaire les matériaux. Elle classe les bétons selon :

- leurs performances mécaniques (résistance en traction par fendage et résistance en compression) ;
- les caractéristiques des granulats entrant dans leur composition.

Pour les chantiers relevant de la maîtrise d'ouvrage de l'État, des prescriptions et spécifications complémentaires sont introduites en 1978 dans la directive de la Direction des routes pour la *Réalisation des chaussées en béton de ciment* [23]. Cependant, cette directive concerne essentiellement les chaussées comportant une couche de fondation traitée, et dont la couche de base est un béton dense dosé à plus de 330 kg de ciment par m³.

7.1.1. Caractéristiques des bétons selon la norme NF P 98-170

- *Spécifications se rapportant aux constituants*

Le ciment doit être conforme à la norme NF P 15-301. Pour satisfaire aux conditions d'exécution des chaussées béton et en particulier pour prévenir une fissuration anarchique lors de la prise, il est recommandé que le ciment réponde aux caractéristiques complémentaires de l'annexe B de la norme NF P 98-170.

Les granulats doivent répondre aux spécifications de la norme NF P 18-301. Des recommandations sur le choix entre classes de granulats figurent dans l'annexe B de la norme NF P 98-170 ; elles dépendent du trafic, de la fonction de la couche de béton dans l'ouvrage, du mode de mise en œuvre et du mode de traitement de surface.

Les fines d'apport doivent être conformes à la norme NF P 18-501.

Des adjuvants (plastifiant, retardateur) peuvent être utiles pour améliorer la maniabilité, le délai de mise en œuvre ou pour diminuer le dosage en eau. L'emploi d'un entraîneur d'air est obligatoire pour que le béton résiste au gel. Tous les adjuvants doivent être conformes à la norme NF P 18-103.

- *Spécifications sur les performances mécaniques*

Les bétons sont classés (tableau V.7.1.) suivant la **valeur caractéristique** (valeur moyenne moins deux écarts-types) de la résistance mécanique à 28 jours (ou 56 j dans le cas d'un liant à prise lente), déterminée par l'essai de fendage (norme NF P 18-408) ou par l'essai de compression (norme NF P 18-406). Les mesures sont effectuées sur des éprouvettes d'éclatement 2 et de dimensions conformes à la norme NF P 18-400.



*Tableau V.7.1.
Classes de résistance des bétons selon la norme*

Classe de résistance	Résistance caractéristique à 28 jours en fendage NF P 18 408 (MPa)
6	3,3
5	2,7
4	2,4
3	2,0
2	1,7
1	1,3

7.1.2. Exigences relatives à l'emploi

Le choix des constituants du béton, de leurs caractéristiques et de leurs proportions dans le mélange découle d'objectifs :

- économiques, afin de trouver le meilleur compromis entre le coût et les caractéristiques mécaniques,
- techniques, selon la nature de la couche de chaussée et le mode de mise en œuvre.

Ces objectifs techniques visent à obtenir :

- une maniabilité compatible avec le mode de serrage (vibration et moulage),
- certaines caractéristiques mécaniques pour le matériau durci (classe de résistance mécanique, module d'élasticité, résistance au gel, classe d'érodabilité pour les matériaux de couche de fondation),
- la maîtrise des phénomènes de retrait,
- des caractéristiques d'adhérence et de résistance à l'usure pour les bétons assurant le rôle de couche de roulement.

• Liant

Pour les ciments normalisés, la catégorie, la classe, ainsi que le dosage sont les paramètres essentiels qui influent sur la résistance du béton durci et son évolution au jeune âge. Les ciments les plus utilisés sont les CPJ et les CPA. Les CHF et CLK ne sont pas à exclure, principalement si les délais de mise en service de la chaussée sont longs (> 28 jours).

• Granulats

Les granulats sont importants dans l'évaluation des transferts de charge entre dolles, que ce soit au droit des fissures (béton armé continu) ou au droit des joints. C'est pourquoi, pour les couches de base et de roulement, les exigences sont d'autant plus sévères que le trafic est fort.

• Performances mécaniques

En couche de base, pour les trafics supérieurs à T3, il est recommandé de choisir des bétons de classe de résistance au moins égale à 4. L'emploi de matériaux de classe inférieure n'est en général pas économique et ne permet pas d'assurer le rôle d'une couche de roulement de façon durable. Pour les faibles trafics, on peut envisager l'utilisation de matériaux de classe 3.

En couche de fondation, pour les forts trafics, les bétons doivent être avant tout non érodables pour assurer le bon comportement à long terme de la structure; des spécifications sont définies sur les classes d'érodabilité. Les résistances mécaniques doivent correspondre aux classes de résistance 2 ou 3.

7.1.3. Spécifications relatives à la mise en œuvre

Lorsque le serrage du béton est uniquement assuré par une vibration de surface (matériel correspondant au type A de la norme NF P 98-170), l'épaisseur maximale de mise en œuvre est de 15 cm. Au-delà, il est difficile d'obtenir une bonne régularité de la densité et donc de la résistance du béton.

Les machines équipées d'une batterie d'aiguilles vibrantes (matériel correspondant aux types B et C de la norme) permettent de mettre en œuvre des épaisseurs comprises entre 10 et 50 cm avec des caractéristiques homogènes.

7.1.4. Performances mécaniques pour le dimensionnement

• Comportement en fatigue

Des études expérimentales ont montré un comportement en fatigue des bétons de ciment similaire en traction par fendage, et en flexion. Ce comportement est représenté par une courbe de Wöhler :

$$\sigma/f_t = 1 + \beta \log N$$

ou, pour un ajustement de la loi de fatigue entre 10^5 et 10^7 cycles, par l'équation :

$$\sigma = \sigma_6 (N/10^6)^b$$

avec $b = -0,5 \log \{ (1+5\beta)/(1+7\beta) \}$

Bien qu'établie à partir d'essais de fatigue en traction par flexion, la formule sera utilisée dans le dimensionnement à partir de la résistance en fendage.

• Caractéristiques des matériaux pour le dimensionnement

– Valeurs de référence

Pour les matériaux conformes à la norme NF P 18-170, le tableau V.7.2. donne des valeurs représentatives des résistances moyennes à 28 jours en traction par fendage, f_t , à considérer dans la méthode de dimensionnement.

Tableau V.7.2.
Valeurs de référence pour les performances mécaniques des bétons normalisés

Matériau (classe)	f_t (MPa) à 28 jours	E (MPa) à 28 jours
5	3,3	35 000
4	3	24 000
3	2,5	24 000
2	2,1	20 000

– Les paramètres de calcul

Les paramètres caractérisant les matériaux nécessaires pour le dimensionnement des structures de chaussée en béton de ciment sont :

- σ_6 , la contrainte de rupture à 10^6 cycles,

- E le module d'Young,
- b, exposant de l'expression de la loi de fatigue

$$\sigma = \sigma_6 (N/10^6)^b$$

- SN (logN), écart-type sur la loi de fatigue.

Le tableau V.7.3. présente les valeurs des paramètres de calcul pouvant être retenues comme référence pour les bétons conformes à la norme.

*Tableau V. 7.3.
Valeurs de référence des paramètres de calcul pour les bétons conformes à la norme*

Classe	σ_6 (MPa)	E (MPa)	- 1/b	SN (logN)
5	2,15	35 000	16	1
4	1,95	24 000	15	1
3	1,63	24 000	15	1
2	1,37	20 000	14	1

- Paramètres de calcul tirés d'essais de laboratoire

La résistance σ_6 à 360 jours peut être déduite d'essais de résistance en fendage réalisés sur un minimum de six éprouvettes lors d'une étude de composition conforme à la norme NF P 98-170, à partir de la relation :

$$\sigma_6 = 0,65 f_t$$

f_t étant égale à la moyenne des valeurs obtenues à 28 jours, ou 56 jours si le liant est à prise lente. Pour les essais qui cernent l'incidence de la composition sur la résistance mécanique du béton, les valeurs trouvées doivent rester supérieures à 90 % de la résistance moyenne f_t .

Le module d'Young est déterminé en compression ou en flexion sur un minimum de six éprouvettes ; la valeur retenue est la moyenne des valeurs mesurées.

La pente de la courbe de fatigue est déduite du tableau V.7.3., en retenant la valeur correspondant à la classe de béton ayant la résistance de référence f_t inférieure la plus proche de celle du matériau étudié.

Page laissée blanche intentionnellement



VI. DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES NEUVES

1. PLACE DE L'ÉTUDE DE DIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE DANS L'ÉTUDE DU PROJET ROUTIER

- 1.1. RELATION AVEC LES AUTRES COMPOSANTES DU PROJET ROUTIER
- 1.2. LES ÉTUDES PRÉLIMINAIRES NÉCESSAIRES
- 1.3. PHASES D'ÉTUDE DU PROJET DE CHAUSSEE
- 1.4. CAS DES PROPOSITIONS TECHNIQUES FAITES PAR L'ENTREPRISE DANS LE CADRE DE VARIANTES OU DE CONCOURS

2. DONNÉES REQUISES POUR LE DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSÉES NEUVES

- 2.1. LE TRAFIC
- 2.2. LES PARAMETRES DE BASE DU CALCUL
- 2.3. LES DONNÉES CLIMATIQUES ET D'ENVIRONNEMENT
- 2.4. LES PARAMETRES DESCRIPTIFS DE LA PLATE-FORME SUPPORT
- 2.5. LES MATÉRIAUX ÉLABORÉS DES COUCHES DE CHAUSSÉES

3. LA DÉMARCHE DE DIMENSIONNEMENT

4. DIMENSIONNEMENT DES DIFFÉRENTES FAMILLES DE STRUCTURES DE CHAUSSEE

- 4.1. VÉRIFICATION COMMUNE VIS-À-VIS DU SUPPORT ET DES COUCHES NON LIÉES
- 4.2. LES CHAUSSÉES SOUPLES ET BITUMINEUSES ÉPAISSES
- 4.3. LES CHAUSSÉES À ASSISE TRAITÉE AUX LIANTS HYDRAULIQUES
- 4.4. LES CHAUSSÉES À STRUCTURE MIXTE
- 4.5. LES CHAUSSÉES À STRUCTURE INVERSE
- 4.6. LES CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT

5. VÉRIFICATION AU GEL/DÉGEL

- 5.1. CHOIX DE L'HIVER DE RÉFÉRENCE
- 5.2. CALCUL DE L'INDICE DE GEL ADMISSIBLE
- 5.3. EXEMPLE DE CALCUL DE VÉRIFICATION AU GEL/DÉGEL

6. DÉFINITION DE LA COUPE TRANSVERSALE DE LA CHAUSSEE

- 6.1. CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES
- 6.2. CONSTRUCTION DE LA PLATE-FORME SUPPORT DE CHAUSSEE
- 6.3. CONSTITUTION DES CHAUSSÉES, ACCOTEMENTS ET TERRE-PLEINS CENTRAUX
- 6.4. COORDINATION DES PENTES TRANSVERSALES

Page laissée blanche intentionnellement

1. PLACE DE L'ÉTUDE DE DIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE DE CHAUSSÉE DANS L'ÉTUDE DU PROJET ROUTIER

L'étude de dimensionnement de la structure de chaussée s'insère dans l'ensemble des études techniques, en aval des études socio-économiques qui auront servi à cerner la fonction économique du projet d'infrastructure routière.

Comme cela a été indiqué précédemment (II.3.), les choix économiques effectués par le maître d'ouvrage lors de ces études préalables vont amener celui-ci à arrêter des décisions de caractère technique qui pèseront directement sur l'étude de la chaussée, son dimensionnement et le choix des techniques. Il s'agit en particulier :

- du niveau de service recherché, qui se traduit entre autres par une définition des risques d'interruption de trafic acceptés, et par des exigences sur la nature et les caractéristiques de la couche de roulement,
- de la stratégie d'investissement et d'entretien, qui oriente le choix de la durée de calcul.

Outre ces données de base, l'étude de la structure de chaussée nécessite la prise en compte d'éléments issus d'autres composantes du projet routier : la géométrie, les terrassements, l'assainissement et le drainage, ce qui peut en retour conduire à modifier certains de ces points.

On examine donc ci-après :

- les relations entre l'étude de la chaussée proprement-dite et celles des autres aspects du projet routier,
- les études préliminaires et les phases ultérieures de l'étude de chaussée,
- enfin, le cas des études faites par l'entreprise dans le cadre de propositions de variantes ou de concours.

Nota : A titre d'information, sont indiqués en référence les documents précisant la méthodologie d'étude et les spécifications retenues par la Direction des routes pour l'élaboration des projets du réseau routier national français.

1.1. RELATION AVEC LES AUTRES COMPOSANTES DU PROJET ROUTIER

1.1.1. Relations avec la géométrie

La géométrie du projet rejaillit sur le projet de chaussée de plusieurs façons :

- à travers la nature et les caractéristiques mécaniques de la plate-forme support de chaussée, issue du projet de terrassements et résultat de la confrontation de normes géométriques [7], [9], [10] et des caractéristiques du site dans lequel s'inscrit l'infrastructure projetée ;
- sur le choix de la couche de surface (demande d'adhérence élevée sur un tracé sinueux, résistance à l'ornièrage dans le cas d'un profil en long en forte rampe avec un trafic poids lourds élevé...).

La position de la ligne rouge des terrassements doit bien sûr être fixée en cohérence avec le choix du type de structure de chaussée.

1.1.2. Relation avec l'exploitation de la route

Les choix de politique d'entretien pourront peser sur la conception de la chaussée (et réciproquement), ceci étant vrai du choix de la couche de roulement et de certaines dispositions constructives du profil en travers (position des équipements de sécurité dans le profil en travers...).

1.1.3. Relation avec les travaux de terrassement

La méthodologie développée en France pour les études géotechniques des projets routiers se trouve exposée dans des documents techniques précisant :

- l'organisation et le contenu des reconnaissances géologique et géotechnique des tracés de routes et autoroutes [18],
- une démarche pour les travaux de terrassement [19].

Les caractéristiques de portance à long terme de la plate-forme support de chaussée, elles-mêmes conditionnées par les dispositions d'assainissement et de drainage [11], sont l'une des données d'entrée essentielles pour le dimensionnement de la chaussée.

Les progrès enregistrés dans les techniques et méthodes de traitement et de compactage permettent de réaliser des couches de matériaux traités ayant des caractéristiques mécaniques élevées et une dispersion limitée. Ceci offre des possibilités de valorisation des matériaux locaux, et d'optimisation du coût de l'ensemble chaussée-couche de forme, par une amélioration éventuelle de la portance de la plate-forme support de chaussée.

1.2. LES ÉTUDES PRÉLIMINAIRES NÉCESSAIRES

Comme on le verra de façon détaillée dans le chapitre 2, l'étude de dimensionnement de la chaussée nécessite, outre les informations fournies par l'étude géotechnique sur la plate-forme support, le recueil préalable de données sur :

- le trafic,
- l'environnement climatique et hydrologique,
- les propriétés des matériaux de chaussée envisagés.

1.2.1. Trafic

S'agissant d'une infrastructure nouvelle, il y a lieu d'estimer les reports de trafic des infrastructures en place sur celle projetée, leur évolution au cours du temps, ainsi que la composition de ce trafic.

1.2.2. Données climatiques

Les informations pertinentes sont de diverses natures :

- une connaissance de la pluviométrie vis-à-vis des dispositions d'assainissement et de drainage,
- les cycles de température pour déterminer des températures caractéristiques pour l'étude du comportement en fatigue et la résistance à l'orniérage des matériaux bitumineux, ou pour déterminer les sollicitations subies par les dalles des chaussées en béton de ciment,
- des données historiques sur l'intensité des périodes de gel, afin de choisir la situation de référence pour laquelle la protection au dégel de la chaussée est assurée.

1.2.3. Propriétés des matériaux de chaussée

Les méthodologies d'étude et les caractéristiques des matériaux de chaussée nécessaires pour le dimensionnement sont traitées dans la partie V.

1.3. PHASES D'ÉTUDE DU PROJET DE CHAUSSÉE

On distingue généralement deux niveaux d'études : sommaire et détaillé.

A l'amont, les études sommaires visent principalement à estimer le montant du projet. A ce stade, les études géologiques et géotechniques ne sont pas suffisamment détaillées pour qu'on puisse déterminer avec précision la portance du support. Le type de structure est généralement retenu par similitude avec des chantiers antérieurs de même nature et importance.

Le niveau d'étude détaillée vise à définir les caractéristiques techniques du projet. En matière de chaussée, il peut être décomposé en plusieurs phases ; la première considère individuellement chacune des sections de terrassement du projet, les suivantes traitent de l'ensemble du tracé.

Première phase – Étude par tronçons homogènes

Pour chaque tronçon homogène de terrassement sont déterminées une valeur minimale de portance de la plate-forme support de chaussée ainsi qu'une épaisseur minimale de la couche de forme. Il en résulte sur l'ensemble du tracé une succession de tronçons présentant des différences d'épaisseur de chaussée.

Deuxième phase – Étude des solutions pour la plate-forme

Pour atteindre des cadences de réalisation industrielles, les épaisseurs nominales des couches de chaussées doivent rester identiques sur des longueurs les plus importantes possibles. On étudie donc les différentes solutions envisageables pour constituer la plate-forme support de chaussée sur l'ensemble du tracé, en tenant compte des contraintes de réalisation (période d'exécution qui conditionne l'état des sols au moment du chantier, délais de réalisation).

Troisième phase – Dimensionnement de différentes solutions de structure de chaussée

Les données complémentaires une fois recueillies, pour chaque technique de chaussée et solution de couche de forme envisagée :

- on choisit la couche de surface en fonction du trafic attendu et des conditions particulières au projet (site, caractéristiques géométriques, politique d'entretien...),
- on détermine les épaisseurs d'assise selon la démarche exposée dans la partie VI.

Dans cette partie de l'étude les conditions d'exécution de la chaussée interviennent par :

- les valeurs maximales et minimales d'épaisseur des couches, du fait des possibilités des engins de répandage et des performances des engins de compactage. Ceci conduit à un ajustement des résultats des calculs de dimensionnement et à préciser le découpage entre couches.
- la qualité de la liaison entre couches qui pourra ou non être réellement obtenue, la situation d'adhérence au de glissement aux interfaces ayant une forte répercussion sur l'épaisseur de la chaussée (au sa durée de service).

La détermination des épaisseurs est complétée par la définition du profil en travers [8].

Quatrième phase – Sélection de la technique de chaussée

Une comparaison économique globale coût d'investissement + coût d'entretien cumulé, actualisé, sur la période de référence, sert au choix entre les différents types de chaussées envisagés, en tenant compte des conditions locales du projet et des difficultés d'exploitation liées à l'entretien qui peuvent orienter la décision.

1.4. CAS DES PROPOSITIONS TECHNIQUES FAITES PAR L'ENTREPRISE DANS LE CADRE DE VARIANTES OU DE CONCOURS

Le maître d'ouvrage peut dans certains cas envisager un appel d'offre avec variantes ou concours afin de laisser une certaine initiative aux entreprises dans la proposition de solutions de techniques de chaussée. Ceci peut aller :

- d'un appel d'offre avec variantes limitées dans lequel l'entreprise peut présenter, en plus de la solution de base, des propositions techniques sur les points particuliers précisés dans le règlement de la consultation, RC, en respectant la conception technique d'ensemble de la solution de base ;
- à un concours pour lequel seuls sont exprimés les objectifs de performances de l'ouvrage.

Dans le cas de variantes limitées admises sur :

- le remplacement de matériaux de certaines couches de chaussée par des matériaux de même famille, conformes aux normes ou bénéficiant d'un avis technique ou de références, mais différant de la solution de base par les constituants, la composition ou la classe mécanique,
- les méthodes de mise en œuvre ou les dispositions constructives (dans la mesure où leur incidence sur le comportement de la structure est connue et maîtrisée),

la variante sera justifiée selon la même méthode que la solution de base avec les paramètres de calcul adéquats et pour les mêmes hypothèses (durée de calcul, protection au gel...), l'entreprise apportant dans sa réponse toutes les justifications nécessaires.

Dans le cas où la conception de la structure de chaussée est laissée à l'initiative de l'entreprise :

- si les matériaux, la conception et la méthode de construction sont couverts par le présent document, la structure sera justifiée selon la méthode proposée en partie VI ;
- si les matériaux ou la méthode d'exécution envisagés, ou le modèle de calcul retenu, s'écartent des solutions éprouvées codifiées par le présent document, il appartient à l'entreprise d'apporter l'ensemble des justificatifs à l'appui de sa proposition (sur le choix des caractéristiques mécaniques des matériaux, le calcul des sollicitations, le choix des valeurs de coefficient de calage). Le maître d'œuvre pourra demander, dans le cahier des clauses administratives particulières, des garanties particulières selon le risque admis.

Dans tous les cas, pour un jugement correct des solutions proposées :

- d'une part le règlement de la consultation devra préciser clairement les hypothèses de base : durée et risque de calcul, protection au gel, trafic, caractéristiques de la plate-forme support, les exigences éventuelles sur l'entretien ultérieur et les scénarios d'entretien utilisés pour la comparaison des offres, etc.,
- d'autre part, il sera fait attention dans l'analyse des propositions à ce que les valeurs des paramètres (caractéristiques mécaniques, dispersion sur les épaisseurs, coefficients d'agressivité et de calage...) ou des hypothèses (liaisons entre couches, transfert de charges aux joints...) soient conformes aux propositions du présent document ou bien étayées par l'expérience.

2. DONNÉES REQUISES POUR LE DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSÉES NEUVES

Ce chapitre présente les données nécessaires à l'application de la méthode de dimensionnement. Ces données sont classées en quatre catégories :

- le **trafic**,
- les **paramètres de base du calcul** ; il s'agit des paramètres de calcul dont le choix des valeurs découle de l'analyse de la fonction économique de la route faite par le maître d'ouvrage ;
- les **données climatiques et d'environnement** ; ceci regroupe les données descriptives des conditions climatiques du site du projet ayant une influence directe sur le choix de certaines variables de calcul ;
- les **paramètres descriptifs des matériaux** ; cet ensemble correspond aux propriétés des matériaux de chaussée et du support qui sont nécessaires au calcul de la structure de chaussée.

2.1. LE TRAFIC

La connaissance du trafic poids lourds intervient :

- comme critère de choix des qualités de certains constituants entrant dans la fabrication des matériaux de chaussée (par exemple dureté des granulats),
- comme paramètre d'entrée pour l'analyse mécanique du comportement en fatigue de la structure de chaussée.

Sont définis comme poids lourds les véhicules de charge utile supérieure ou égale à 5 tonnes.

Vis-à-vis du premier objectif, une information sur le volume journalier du trafic poids lourds sera généralement suffisante sans qu'il soit nécessaire d'en détailler la composition. On se référera ici à la notion de **classe de trafic**.

Pour le calcul de dimensionnement, c'est le trafic cumulé sur la durée initiale de calcul qui est à prendre en considération ; ceci est fait à travers la notion de **trafic équivalent**.

La détermination des trafics routiers pour le dimensionnement des structures de chaussées fait l'objet de la norme NF P 98-082.

2.1.1. Les classes de trafic

La classe de trafic T_i est déterminée à partir du trafic poids lourds par sens, compté en **moyenne journalière annuelle** (MJA), pour la voie la plus chargée, à l'année de mise en service.

Dans le cas des chaussées à deux voies de faible largeur (inférieure à 6m), pour tenir compte du recouvrement des bandes de roulement, on retiendra la règle suivante pour calculer MJA :

- largeur inférieure à 5 m : 100 % du trafic total PL des deux sens,
- largeur comprise entre 5 et 6 m : 75 % du trafic total PL des deux sens.

Dans le cas des chaussées à voies séparées, la voie la plus chargée est généralement la voie lente. A défaut d'information sur la répartition probable du trafic entre voies (et sans avoir tenu compte des possibles basculements de circulation pour les travaux d'entretien notamment), on pourra retenir :

– en rase campagne

- chaussées à 2 x 2 voies
 - voie lente 90 % du trafic PL pour le sens considéré
 - voie rapide 10 %
- chaussées à 2 x 3 voies
 - voie lente 80 %
 - voie médiane 20 %
 - voie rapide 0 %

– en péri-urbain

- chaussées à 2 x 2 voies
(à définir au cas par cas)
- chaussées à 2 x 3 voies
 - voie lente 65 %
 - voie médiane 30 %
 - voie rapide 5 %

Les classes de trafic sont déterminées par les limites données par le tableau VI.2.1.

Classe	T5		T4		T3		T2		T1		T0		TS		TEX
	T5-	T5+	T4-	T4+	T3-	T3+	T2-	T2+	T1-	T1+	T0-	T0+	TS-	TS+	
MJA	0	25	50	85	150	200	300	500	750	1 200	2 000	3 000	5 000		

2.1.2. Le trafic équivalent

Pour le calcul de dimensionnement, le trafic est caractérisé par le nombre NE, nombre équivalent d'essieux de référence correspondant au trafic poids lourds cumulé sur la durée initiale de calcul retenue.

En France, l'essieu de référence est l'**essieu isolé à roues jumelées de 130 kN** (essieu maximum légal).

Ce nombre NE est fonction :

- des valeurs escamptées du trafic à la mise en service et du taux de croissance¹ τ pendant la durée initiale de calcul,
- de la composition du trafic (distribution des natures d'essieux et des charges à l'essieu),
- de la nature de la structure de chaussée.

Il est calculé par la relation :

$$NE = N \times CAM$$

avec,

- N : nombre cumulé de poids lourds pour la période de calcul de p années,
- CAM : agressivité moyenne du poids lourds par rapport à l'essieu de référence

1. Le taux de croissance pour l'étude de dimensionnement est parfois différent de celui retenu dans l'étude de circulation.

- Calcul du nombre total N de poids lourds

N est égal à :

$$N = 365 \times MJA \times C$$

où C est le facteur de cumul sur la période de calcul.

La classe de trafic une fois déterminée, on retient usuellement pour le calcul de dimensionnement la valeur de MJA correspondant à la moyenne géométrique des limites de la classe.

Pour p années et un taux de croissance géométrique τ constant sur cette période, C s'obtient par la formule :

$$C = [(1 + \tau)^p - 1] / \tau$$

Si l'hypothèse d'un taux de croissance constant semble peu probable, le calcul de C est affiné en modulant ce taux à l'intérieur de l'intervalle des p années.

- Valeur du coefficient d'agressivité CAM

La configuration des essieux (isolé, tandem, tridem), des roues (simples ou jumelées) et leur charge sont variables d'un poids lourd à l'autre. Par ailleurs pour une charge donnée, les contraintes et déformations dans la chaussée, à un certain niveau, sont fonction de la structure de chaussée. Vis-à-vis du comportement en fatigue enfin, l'endommagement provoqué par l'application d'une charge donnée dépend de la nature des matériaux. Ainsi, un poids lourd n'aura pas la même agressivité selon qu'il circule sur une chaussée bitumineuse souple, ou une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques.

Si l'on dispose d'estimations fiables sur la composition du trafic (distribution des essieux et des charges à l'essieu), à partir de mesures de pesée d'essieux sur des routes de même catégorie et dans un même contexte géographique, on pourra calculer le coefficient CAM selon la méthode développée dans l'annexe A5. En l'absence des informations nécessaires pour mener un tel calcul, on pourra retenir pour CAM les valeurs données par le tableau VI.2.2.

Tableau VI.2.2.
Coefficients d'agressivité selon le trafic et le type de chaussée

	CAM	0,4	0,5	0,7	0,8
Chaussées à faible trafic	Classe	T5	T4	T3-	T3+
	CAM	0,8	1	1,3	
Chaussées à trafic moyen et fort		Couches hydrocarbonées des structures mixtes et inverses	Chaussées bitumineuses d'épaisseur supérieure à 20 cm	Couches de matériaux traités aux liants hydrauliques et en béton de ciment	
		Couches hydrocarbonées d'épaisseur au plus égale à 20 cm des chaussées bitumineuses	Couches non liées et sol support		

Ces valeurs de coefficient d'agressivité CAM sont appliquées pour la détermination du nombre cumulé d'essieux équivalents NE, pour les justifications vis-à-vis du comportement en fatigue des couches liées et vis-à-vis du risque d'orniérage du sol support ou des couches non liées.

2.2. LES PARAMETRES DE BASE DU CALCUL

Comme il est indiqué en partie I, l'étude de dimensionnement d'une structure de chaussée doit être envisagée en termes probabilistes. La première étape de la démarche est de faire le choix d'une valeur de probabilité de rupture de la chaussée à l'issue de p années, compte tenu du trafic escompté.

Le choix de cette durée initiale de calcul et du risque de calcul qui est associé correspond à un objectif économique. Le tableau VI.2.3. présente à titre d'illustration les valeurs retenues pour l'actualisation du catalogue 1977 des chaussées des routes nationales.

	T0	T1	T2	T3
Grave-bitume	2 %	5 %	12 %	25 %
Grave hydraulique	2,5 %	5 %	7,5 %	12 %

2.3. LES DONNÉES CLIMATIQUES ET D'ENVIRONNEMENT

Les conditions climatiques :

- abondance des précipitations en liaison avec le drainage,
 - cycles saisonniers et valeurs extrêmes de la température,
 - intensité et durée des périodes de gel et de dégel,
- ont une influence sur la résistance, la durabilité et les caractéristiques de déformabilité des chaussées et de leur support.

Les conditions climatiques interviennent dans le choix de la nature des liants hydrocarbonés.

Les conditions hydrologiques en liaison avec le profil géométrique (déblai, remblai) et les dispositions de drainage ont une incidence importante sur l'état hydrique de la plate-forme support.

Les données directement utilisées dans le calcul de dimensionnement se rapportent :

- à l'état hydrique du sol support,
- aux cycles saisonniers de température,
- à l'intensité des périodes de gel.

2.3.1. État hydrique du sol support

Ainsi qu'il est indiqué en partie IV, l'état hydrique du sol support est pris en considération à travers la portance de la partie supérieure des terrassements :

- au moment de l'exécution des couches de chaussée,
- pour le dimensionnement en considérant la valeur correspondant à la situation la plus défavorable (périodes de dégel exclues) que l'on peut attendre compte tenu du climat et des conditions de drainage.

2.3.2. Les cycles saisonniers de température

La connaissance pour un projet des cycles saisonniers de température est utile du fait :

- de la sensibilité des propriétés de déformabilité et de résistance des matériaux bitumineux à la température,
- de l'importance des sollicitations engendrées par les gradients thermiques dans les structures rigides.

La manière selon laquelle la température influe sur les propriétés des matériaux hydrocarbonés et celle par laquelle est choisie une valeur de température équivalente pour le calcul de la structure, sont décrites dans la partie V et l'annexe A6.

2.3.3. Intensité des périodes de gel

La tenue au gel-dégel des chaussées est vérifiée par la méthode exposée dans la partie VI.5.

Dans cette méthode, les conditions climatiques sont caractérisées par la valeur de l'indice de gel atmosphérique IA, exprimé en °C. jour. Il revient au maître d'ouvrage de fixer l'indice de gel de référence ; c'est un choix qui conditionnera la fréquence des passes éventuelles de barrières de dégel.

En France, on dispose de données sur l'ensemble du territoire de la métropole depuis 1951 (et de séries plus anciennes pour différentes stations météorologiques).

Il est considéré deux types d'hivers :

- l'**hiver exceptionnel** qui correspond à l'hiver le plus rigoureux connu,
- et l'**hiver rigoureux non exceptionnel**, correspondant à une certaine période de retour. Pour le catalogue des structures 1977, l'hiver rigoureux non exceptionnel était l'hiver de rang 3 pour la période d'observation allant de 1951 à 1976, soit une période de retour de l'ordre de 8 ans.

Les mesures des stations météorologiques réparties sur le territoire indiquent que :

- les valeurs d'indice de gel de l'hiver exceptionnel varient en France entre 0 et 420 °C. j selon le lieu,
- pour un tiers d'entre elles, l'indice de gel de l'hiver rigoureux non exceptionnel est supérieur à 100.

2.4. LES PARAMETRES DESCRIPTIFS DE LA PLATE-FORME SUPPORT

2.4.1. Le sol support

La méthodologie d'identification et de caractérisation des sols support de chaussée a été présentée dans la partie IV.

Pour le calcul des sollicitations dans le corps de chaussée sous l'essieu de référence, le sol support est généralement assimilé à un milieu élastique décrit par :

- un module d'Young et un coefficient de Poisson, choisis, comme indiqué plus haut, comme représentatifs du compartiment dit à long terme pour la partie supérieure des terrassements, PST.

Pour le **coefficient de Poisson**, on retiendra la valeur moyenne de **0,35** sachant que ce paramètre varie avec la nature des sols, leur état hydrique et les sollicitations appliquées¹.

- l'épaisseur de terrain meuble, lorsque la position du substratum rocheux a été reconnue à faible profondeur².

Dans le cas des chaussées souples et bitumineuses épaisses, le corps de chaussée doit être dimensionné pour éviter l'ornièrage du support par cumul de déformations permanentes à ce niveau. Pour les autres structures de chaussée plus rigides, c'est le critère de résistance en fatigue des couches d'assise qui est presque toujours déterminant.

A défaut de méthode de calcul et de données permettant d'estimer l'évolution des déformations permanentes en fonction des contraintes et du nombre d'applications de charges, le dimensionnement de la structure de chaussée, vis-à-vis du risque d'ornièrage du support, est fait en limitant la déformation verticale, ε_z , du support. Les observations faites sur certaines chaussées bitumineuses permettent de rapprocher empiriquement un critère de la forme $\varepsilon_{z,ad} = f(N)$ d'une valeur limite de profondeur d'arrière du sol support (cf. VI.4.1.).

2.4.2. La couche de forme

Pour ce qui concerne le choix de la couche de forme et la vérification du dimensionnement du corps de chaussée, deux approches sont employées en pratique.

Dans la première approche, traditionnelle, l'épaisseur de la couche de forme est sélectionnée en fonction de la portance du sol support et de l'objectif de portance recherché pour la plate-forme support, à l'aide des tableaux de surclassement donnés dans la partie IV. Pour les calculs de vérification de la structure de chaussée, l'ensemble sol support + couche de forme est alors assimilé à un massif homogène décrit par un couple (module d'Young et coefficient de Poisson). Vis-à-vis de la plate-forme, il est vérifié que le critère sur la déformation verticale est satisfait sous l'assise de chaussée.

Dans la seconde approche, la couche de forme est individualisée comme une couche de chaussée dans le calcul de la structure. Cette approche se prête aux cas où l'on cherche à optimiser les épaisseurs de l'ensemble chaussée + couche de forme en fonction des caractéristiques mécaniques qui pourront être réellement obtenues sur chantier avec le matériau de couche de forme. Dans ce cas, les caractéristiques mécaniques de ce matériau doivent être déterminées en propre ainsi que celles du support en procédant conformément aux propositions faites dans la partie IV. Les vérifications à effectuer sont à distinguer selon la nature de la couche de forme :

- **avec les couches de forme en matériaux non traités**, il doit être vérifié que les valeurs de déformation verticale au sommet de la couche de forme et du sol support sont admissibles. On retiendra les relations $\varepsilon_{z,ad} = f(N)$ données dans le paragraphe VI.4.1.1. ;
- **les couches de forme en matériaux traités** sont vérifiées en fatigue en adoptant le modèle indiqué par la partie IV. Il doit en outre être vérifié que la déformation verticale en surface du sol support est admissible.

1. Antérieurement les calculs étaient généralement effectués en retenant la valeur de 0,25.

2. Cette information est surtout nécessaire en cas d'interprétation de mesures de déflexion pour en déduire les caractéristiques mécaniques du support.

2.5. LES MATERIAUX ELABORES DES COUCHES DE CHAUSSÉES

2.5.1. Les graves non traitées

- *Caractéristiques intrinsèques*

La méthode de calcul nécessite, pour représenter le comportement réversible sous une charge, la donnée d'une valeur de module d'Young E et du coefficient de Poisson.

En suivant les errements courants, on se reportera au tableau V.3.2. de la partie V.3., rappelé ci-après, pour le choix de la valeur de module d'Young affecté à la couche de grave non traitée selon le type de chaussée.

Tableau V.3.2.
Valeurs de module d'Young des couches de GNT pour le dimensionnement

• Chaussées à faible trafic ($T \leq T3$)									
Couche de base	catégorie 1 * $E_{GNT} = 600$ MPa catégorie 2 * $E_{GNT} = 400$ MPa catégorie 3 * $E_{GNT} = 200$ MPa								
Couche de fondation (GNT subdivisée en sous-couches de 0,25 m d'épaisseur)	$E_{GNT} [1] = k E_{plate-forme support}$ $E_{GNT} [sous-couche i] = k E_{GNT} [sous-couche (i-1)]$ k variant selon la catégorie de la GNT								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Catégorie</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>k</td> <td>3</td> <td>2,5</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	Catégorie	1	2	3	k	3	2,5	2
Catégorie	1	2	3						
k	3	2,5	2						
	E_{GNT} borné par la valeur indiquée en couche de base								
• Chaussées à moyen trafic ($T2$ et $T1$) : structures GB/GNT									
Couche de fondation (GNT subdivisée en sous-couches de 0,25 m d'épaisseur)	$E_{GNT} [1] = 3 E_{plate-forme support}$ $E_{GNT} [sous-couche i] = 3 E_{GNT} [sous-couche (i-1)]$ E_{GNT} borné par 360 MPa								
• Chaussées à structure inverse									
	$E_{GNT} = 480$ MPa								
* conditions précisées dans le tableau V.3.3.									
Nota : les différences de valeurs de module selon la structure rendent compte dans une certaine mesure du caractère non-linéaire des GNT (module plus élevé en couche de base qu'en couche de fondation, valeur plus élevée pour une faible couverture bitumineuse).									

On retiendra, à défaut d'autres données pertinentes, la **valeur de 0,35** pour le **coefficient de Poisson** de ces matériaux.

Vis-à-vis de l'appréciation de l'ornièrage par cumul de déformations permanentes, la méthode usuelle consiste à limiter la déformation verticale ϵ_z au sommet de la couche non liée. Dans ce cas, aucune description complémentaire du comportement mécanique n'est nécessaire.

2.5.2. Les graves traitées aux liants hydrauliques et bétons compactés

- *Caractéristiques intrinsèques*

Compte tenu de l'évolution dans le temps, avec le phénomène de prise, des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques, celles-ci doivent être appréciées :

- à long terme, pour juger du comportement pendant la durée de service projetée;
- à court terme, pour vérifier que la résistance acquise est suffisante vis-à-vis des premières sollicitations (trafic de chantier au lors de la mise en service).

Pour le "long terme", on considère les **caractéristiques à un an**. Le "court terme" est fonction de la programmation des travaux.

La méthode de calcul nécessite :

- pour représenter le comportement réversible sous une charge, la donnée du module d'Young E et du **coefficient de Poisson pris égal à 0,25** pour ces matériaux,
- pour représenter l'endommagement par fatigue :
 - les paramètres σ_6 et b de l'expression de la loi de fatigue choisie de la forme

$$\sigma / \sigma_6 = (N/10^6)^b$$

- l'écart-type SN de la distribution de $\log N$ à la rupture pour 10^6 cycles.

Des valeurs caractéristiques de ces paramètres pour les différentes techniques de grave traitée, et la manière de les déduire des résultats d'essais sont exposées dans la partie V.4.

- *Caractéristique de mise en œuvre*

Le calcul fait intervenir la dispersion, caractérisée par l'écart-type S_h , sur l'épaisseur des couches à la mise en œuvre. Avec les prescriptions courantes sur le nivellement de la plate-forme support de chaussée et la portance minimale du support, la valeur retenue pour S_h est de 3 cm.

Mayennant une maîtrise plus stricte des caractéristiques géométriques de la plate-forme, une portance plus élevée, et un bon guidage des machines, l'écart-type sur la dispersion d'épaisseur peut être réduit à 2 cm.

2.5.3. Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés

- *Caractéristiques intrinsèques*

Les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux dépendant de la température et de la fréquence de sollicitation, le calcul doit être fait pour des valeurs représentatives des conditions du projet.

Pour ce qui est de la fréquence de sollicitation, on retient les caractéristiques à 10 Hz.

La méthode de calcul nécessite :

- pour représenter le comportement réversible sous une charge, la donnée du module d'Young E et du **coefficient de Poisson pris égal à 0,35**.

- pour représenter l'endommagement par fatigue :
 - la donnée de la déformation ε_6 ,
 - la pente b de la loi de fatigue

$$\varepsilon / \varepsilon_6 = (N/10^6)^b$$

- l'écart-type SN de la distribution de logN à la rupture pour 10^6 cycles,

les valeurs de E, ε_6 et b étant choisies pour la valeur de la température équivalente (cf. annexe A6 pour le calcul de la température équivalente compte tenu du cycle thermique annuel).

En France métropolitaine, on retient usuellement une température équivalente de 15 °C.

- Caractéristique de mise en œuvre

Pour les chantiers courants, on retient, pour l'écart-type Sh sur l'épaisseur des couches mises en œuvre, la valeur donnée par le tableau VI.2.4. en fonction de l'épaisseur totale, e, de matériaux bitumineux.

Tableau VI.2.4. – Écart-type sur les épaisseurs à la mise en œuvre de couches en matériaux hydrocarbonés

e (cm)	$e \leq 10$	$10 < e < 15$	$15 \leq e$
Sh (cm)	1	$1 + 0,3(e - 10)$	2,5

Moyennant une maîtrise stricte des caractéristiques géométriques de la plate-forme, une portance élevée, et un répandage vis colée, la dispersion peut être limitée à 1,5 cm.

2.5.4. Les bétons de ciment

- Caractéristiques intrinsèques

Pour les bétons à prise normale, les données retenues pour les calculs de vérification sont déterminées à 28 jours.

Pour les bétons dont le liant est à prise lente, l'échéance peut être reportée à 56 jours.

La méthode de calcul nécessite :

- pour représenter le comportement réversible sous une charge, la donnée du module d'Young E et du **coefficient de Poisson égal à 0,25** ;
- pour représenter l'endommagement par fatigue :
 - les paramètres σ_6 et b de l'expression de la loi de fatigue choisie de la forme

$$\sigma / \sigma_6 = (N/10^6)^b$$

- l'écart-type SN de la distribution de logN à la rupture pour 10^6 cycles.

Les valeurs de référence de ces paramètres ainsi que la manière de les déduire des essais de laboratoire sont exposées dans la partie V.7.

- *Caractéristique de mise en œuvre*

Lorsque les couches de chaussées sont réalisées avec le matériel correspondant au type B ou C de la norme NF P 98-170, on retient comme écart-type Sh de l'épaisseur des couches mises en œuvre :

- pour les couches de base sur fondation traitée, $Sh = 1$ cm,
- pour les autres cas, $Sh = 3$ cm.

Lorsque les couches sont réalisées avec un matériel correspondant au type A de la norme, on retient $Sh = 3$ cm.

3. LA DÉMARCHÉ DE DIMENSIONNEMENT

Comme indiqué au titre I, la méthode française de dimensionnement des structures de chaussées combine :

- une analyse mécanique du fonctionnement de la structure,
- les résultats d'essais de laboratoire sur l'endommagement par fatigue des matériaux de chaussées,
- les connaissances tirées de l'observation du comportement de chaussées réelles, données provenant de sections tests ou d'expériences faites sur le manège d'étude des structures routières du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Quelles que soient les techniques de chaussée, la démarche de dimensionnement et l'articulation des différentes étapes sont sensiblement les mêmes. La démarche générale est présentée ici, le détail propre à chaque technique est donné dans le chapitre 4.

Première étape – Prédimensionnement

Une fois réunies les données nécessaires au calcul, on procède :

- à un premier choix de la couche de roulement, selon les principes exposés dans la partie III,
- à un prédimensionnement de la structure par référence à des situations comparables.

Deuxième étape – Calcul de la structure

On calcule les contraintes et déformations pour le modèle mathématique de la structure de chaussée prédimensionnée à l'étape 1, sous l'essieu de référence de 130 kN. Chaque demi-essieu comporte :

un jumelage à roues simples, représenté par deux charges exerçant une pression uniformément répartie de 0,662 MPa sur 2 disques de 0,125 m de rayon, avec un entre-axe de 0,375 m.

Troisième étape – Vérification en fatigue de la structure et de la déformation du support

La vérification est faite en comparant les contraintes et déformations calculées à l'étape 2 à des valeurs admissibles. Ces valeurs limites sont déterminées en fonction :

- du trafic cumulé sur la période de calcul considérée,
- du risque de ruine admis sur cette période,
- des caractéristiques de résistance en fatigue des matériaux,
- des effets thermiques,
- des données d'observation du comportement de chaussées de même type.

Ce dernier point se traduit par l'introduction d'un coefficient, dit de colage, qui permet de tenir compte globalement d'une part d'effets que le modèle mathématique ne peut représenter de par les simplifications faites, et de l'autre, des biais attachés à la représentativité des essais de laboratoire pour la description des propriétés des matériaux.

Quatrième étape – Ajustement des épaisseurs calculées

Les épaisseurs de couches déterminées à l'issue de l'étape 3 sont ensuite ajustées pour :

- tenir compte des contraintes technologiques d'épaisseurs minimale et maximale pour atteindre les objectifs de compacité et d'uni,
- réduire les risques de défauts de liaison aux interfaces en limitant le nombre d'interfaces,
- assurer une protection suffisante des assises traitées vis-à-vis de phénomènes non appréhendés par le calcul précédent (remontée de fissures en particulier).

Cinquième étape – Vérification de la tenue au gel-dégel

La vérification de la tenue au gel-dégel est une opération distincte menée en fin d'étape 4. Les principes et la démarche de cette vérification sont exposés dans le chapitre 5.

Sixième étape – Définition de la coupe transversale de la chaussée

L'ensemble des vérifications précédentes étant positives, pour la structure dite nominale correspondant au bord droit de la voie la plus chargée, il reste à préciser le profil en travers de la chaussée. Pour cela les variations transversales d'épaisseur des couches sont fixées en fonction : du trafic par voie, des caractéristiques géométriques du tracé, du rattrapage des pentes transversales entre la plate-forme support de chaussée et la couche de surface.

La définition de la structure de chaussée s'achève avec celle des surlargeurs des différentes couches, des accotements et des dispositions constructives. Cet aspect est évoqué dans le chapitre 6.

4. DIMENSIONNEMENT DES DIFFÉRENTES FAMILLES DE STRUCTURES DE CHAUSSÉE

Dans ce chapitre, pour chaque technique, sont explicités :

- la modélisation retenue pour les calculs,
- les critères retenus pour le dimensionnement,
- les étapes de la démarche de dimensionnement.

Chaque présentation est illustrée par un exemple. Pour ne pas compliquer inutilement celle-ci, la démarche et les calculs sont exposés pour une structure de chaussée reposant sur un support homogène. Dans le cas de situations comportant une couche de forme traitée, des vérifications complémentaires sont à effectuer ; on se référera pour cela au VI.2.4.2. et à l'exemple présenté dans l'annexe A7.

4.1. VÉRIFICATION COMMUNE VIS-À-VIS DU SUPPORT ET DES COUCHES NON LIÉES

Les critères indiqués ici étant communs aux différentes structures ne seront pas répétés dans les paragraphes suivants.

4.1.1. Sol support

Pour les différentes structures de chaussée, il sera vérifié que l'orniérage du sol support reste inférieur à la valeur tenue pour admissible. A défaut d'autres données, on procédera à cette vérification en retenant un critère sur la déformation verticale ϵ_z de la forme $\epsilon_{z,ad} = f(NE)$:

- chaussées à moyen et fort trafic ($T \geq T3$)

$$\epsilon_{z,ad} = 0,012 (NE)^{-0,222}$$

- chaussées à faible trafic ($T < T3$)

$$\epsilon_{z,ad} = 0,016 (NE)^{-0,222}$$

Le nombre d'essieux équivalent NE est calculé par application des valeurs du coefficient d'agressivité moyen du trafic CAM données par le tableau VI.4.1.

Tableau VI.4.1.
Valeurs du coefficient d'agressivité moyen pour la justification de la tenue du sol support.

Classe	T5	T4	T3-	T3+	$\geq T2$
CAM	0,4	0,5	0,7	0,8	1

4.1.2. Couches d'assise granulaire

Dans le cas des chaussées à faible trafic (trafic cumulé inférieur à 250 000 essieux standards), composées d'une couche de roulement de faible épaisseur sur une assise granulaire non traitée, il n'est pas introduit de critère de calcul sur le matériau d'assise. C'est par le choix des caractéristiques du matériau que l'on s'assure empiriquement d'une tenue acceptable de la grave non traitée vis à vis de l'orniérage.

Dans les autres cas : chaussée bitumineuse sur fondation en grave non traitée, structure inverse..., la vérification vis à vis de l'orniérage est faite aussi au sommet de la couche granulaire non traitée selon des critères de même type que ceux retenus pour le sol support.



4.2. LES CHAUSSÉES SOUPLES ET BITUMINEUSES ÉPAISSES

La méthode suivante couvre le dimensionnement des chaussées définies en 1.2. comme "souples" et "bitumineuses épaisses".

4.2.1. Modélisation de la structure de chaussée

La structure est représentée par un multicouche élastique, les couches étant collées entre-elles (continuité des déplacements aux interfaces).

Le module d'Young affecté à la grave non traitée varie selon la nature de la couche, l'épaisseur de la couche de fondation, la nature du sol support et la qualité de la grave comme indiqué au paragraphe 2.5.1. précédent.

4.2.2. Critères retenus pour le dimensionnement

• Cas des chaussées à faible trafic

Ce cas est celui des chaussées, constituées d'une couche de roulement mince sur une couche de grave non traitée, devant subir un trafic cumulé inférieur à 250 000 essieux standards.

La couche de roulement peut être un simple enduit jusqu'à un trafic cumulé équivalent NE de 100 000 essieux, ou un béton bitumineux dont l'épaisseur est choisie selon l'abaque de la partie III. (figure III.1.).

L'épaisseur de la couche de base en grave non traitée est fixée à 15 cm jusqu'à un trafic cumulé équivalent NE de 100 000 essieux et à 20 cm au-delà.

L'épaisseur de grave non traitée est déterminée vis-à-vis de l'orniérage du sol support. Le critère à vérifier est que la déformation verticale ε_z à la surface du sol support est inférieure à une valeur limite (cf. VI.4.1.).

La bonne tenue de la grave non traitée est supposée assurée à partir du moment où les spécifications sur le matériau sont respectées (cf. V.3.) et que la couche de roulement demeure imperméable.

• Cas des autres chaussées souples ou bitumineuses épaisses

Pour les chaussées à fondation en grave recomposée humidifiée non traitée, l'épaisseur de matériau granulaire est fixée en fonction de la portance de la plate-forme pour assurer une mise en œuvre correcte de la couche de base. Les épaisseurs minimales retenues sont 15 cm sur PF3, 25 cm sur PF2 et 45 cm sur PF1.

Ces chaussées sont vérifiées par le calcul, vis-à-vis :

- de la rupture par fatigue à la base des couches bitumineuses,
- de l'orniérage des couches non liées et du support.

Deux critères sont à vérifier :

- que l'allongement ε_1 à la base des couches bitumineuses reste inférieur à une valeur admissible,
- que la déformation verticale ε_z à la surface des couches non liées et du sol support est inférieure à une valeur limite (cf. VI.4.1.).

4.2.3. Détermination de l'allongement $\epsilon_{r,ad}$ admissible à la base des couches bitumineuses

La valeur de $\epsilon_{r,ad}$ est donnée par la relation :

$$\epsilon_{r,ad} = \epsilon (NE, \theta_{eq}, f) k_r k_c k_s$$

• $\epsilon (NE, \theta_{eq}, f)$: déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de NE cycles avec une probabilité de 50 %, pour la température équivalente θ_{eq} , et à la fréquence f caractéristique des sollicitations subies par la couche considérée.

La loi de fatigue des matériaux bitumineux est représentée par une relation du type :

$$\epsilon (NE, \theta_{eq}, f) = \epsilon_\delta (\theta_{eq}, f) (NE/10^6)^b$$

Pour les structures en climat tempéré et des températures positives, à défaut de données expérimentales, il sera souvent acceptable de retenir que l'influence de la température sur le comportement en fatigue est représentée par la relation :

$$\epsilon_\delta (\theta) E (\theta)^{0,5} = \text{constante}$$

La loi de fatigue est généralement établie expérimentalement pour une température de 10 °C et une fréquence de 25 Hz. On considère usuellement pour les couches d'assise que la fréquence caractéristique des sollicitations est de l'ordre de 10 Hz et que la correction de fréquence entre 10 et 25 Hz sur la valeur de ϵ_δ peut être négligée pour les températures moyennes.

Dans ces conditions, $\epsilon (NE, \theta_{eq}, f)$ s'exprime sous la forme :

$$\epsilon (NE, \theta_{eq}, f) = \epsilon_\delta (10^\circ\text{C}, 25 \text{ Hz}) [E (10^\circ\text{C})/E (\theta_{eq})]^{0,5} (NE/10^6)^b$$

Lorsque les hypothèses précédentes ne sont plus acceptables :

- températures élevées,
 - fréquence caractéristique des sollicitations très différente (trafic lent, couche de surface),
 - matériau dont la rhéologie s'écarte de celle des produits bitumineux traditionnels,
- l'expression de $\epsilon (NE, \theta_{eq}, f)$ est à déduire de résultats d'études de fatigue pour des conditions d'essais adaptées.

• k_r est un coefficient qui ajuste la valeur de la déformation admissible au risque de calcul retenu en fonction des facteurs de dispersion sur l'épaisseur (écart-type Sh) et sur les résultats des essais de fatigue (écart-type SN)

$$k_r = 10^{-u\delta}$$

u : variable centrée réduite associée au risque r

b : pente de la loi de fatigue du matériau (loi bi-lagarithmique)

δ : écart-type de la distribution de logN à la rupture

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0,5}$$

c : coefficient reliant la variation de déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée, Δh , ($\log \epsilon = \log \epsilon_0 - c \Delta h$). Pour les structures courantes, c est de l'ordre de 0,02 cm⁻¹.

Pour un risque de calcul de 50 %, u = 0 et $k_r = 1$.

- k_c est un coefficient de calage destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement observé de chaussées de même type. Pour les chaussées bitumineuses, les valeurs retenues du coefficient de calage selon la nature du matériau bitumineux sont précisées dans le tableau VI.4.2.

Tableau VI.4.2. – Valeur du coefficient k_c

Matériau	k_c
grave-bitume	1,3
bétans bitumineux	1,1
EME	1

- k_s est un coefficient minorateur tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de portance d'une couche de faible rigidité supportant les couches liées (tableau VI.4.3.).

Tableau – VI.4.3. Valeur du coefficient k_s

Module	$E < 50 \text{ MPa}$	$50 \text{ MPa} \leq E < 120 \text{ MPa}$	$120 \text{ MPa} \leq E$
k_s	1/1,2	1/1,1	1

Nota : le module à considérer est celui du matériau de la couche sous-jacente et non celui caractérisant la rigidité de la plate-forme support. Ainsi, avec une couche de forme épaisse, de module supérieur à 120 MPa, même si la portance de la plate-forme support de chaussée est inférieure à 120 MPa il n'y a pas de minoration à effectuer.

4.2.4. Exemples de dimensionnement

- Chaussée souple à faible trafic

Données

Trafic

Trafic T4 avec un taux de croissance géométrique de 4% par an. Durée initiale : 12 ans

Coefficient d'agressivité moyen du trafic CAM = 0,5

Trafic cumulé par voie $N = 1,94 \cdot 10^5$

Nombre d'essieux équivalents $NE = 0,97 \cdot 10^5$

Couche de surface

Pour ce trafic cumulé il est possible encore d'envisager un simple enduit superficiel.

Plate-forme support

Classe de portance PF1.

$$E = 20 \text{ MPa} \quad \nu = 0,35$$

Caractéristiques mécaniques des matériaux

Pour la couche de base on retient une grave non traitée de catégorie 1 selon le tableau V.3.3., de caractéristiques (cf. tableau V.3.2.) :

$$E = 600 \text{ MPa} \quad \nu = 0,35$$

L'épaisseur de la couche de base est prise égale à 15 cm.

Pour la couche de fondation on retient une grave non traitée de catégorie 2. Le module d'Young affecté par tranche de 25 cm d'épaisseur est (selon le même tableau V.3.2.) :

$$\begin{aligned} E_1 &= 2,5 E_{\text{sol}} = 50 \text{ MPa} \\ E_2 &= 2,5 E_1 = 125 \text{ MPa} \\ E_3 &= 2,5 E_2 = 312 \text{ MPa} \\ \nu &= 0,35 \text{ pour toutes les couches de GNT.} \end{aligned}$$

Conditions de réalisation

Les interfaces sont toutes collées.

Valeurs limites admissibles

Sol support. Déformation verticale $\epsilon_{z,od}$

$$\begin{aligned} \epsilon_{z,od} &= 0,016 (NE)^{-0,222} \\ &= 1250 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

Calcul des contraintes et déformations

L'épaisseur de la grave non traitée de la couche de fondation est le seul paramètre restant à fixer. Les résultats du calcul sont portés dans le tableau VI.4.4.

<i>Tableau VI.4.4.</i>		
<i>Déformation en surface du sol support</i>		
Épaisseur de GNT en fondation (cm)	52	54
ϵ_z en surface du sol (en 10^{-6})	1 270	1 190

Dimensionnement

Compte tenu de la valeur admissible de $1250 \cdot 10^{-6}$ pour la déformation verticale du sol support, la structure de chaussée constituée d'un enduit superficiel sur 15 cm de GNT de catégorie 1 en couche de base et 53 cm de GNT de catégorie 2 en couche de fondation convient. Si l'on avait choisi une couche de roulement faite de 4 cm de béton bitumineux ($E = 5400 \text{ MPa}$ à 15°C) le calcul indique qu'il aurait suffi de 38 cm de GNT en couche de fondation.

- Chaussée bitumineuse épaisse en grave-bitume

Données

Trafic

MJA = 210 PL/jour avec un taux de croissance géométrique de 7% par an.

Durée initiale : 20 ans

Coefficient d'agressivité moyen du trafic CAM = 1

Trafic cumulé par voie N = $3,14 \cdot 10^6$

Nombre d'essieux équivalents NE = $3,14 \cdot 10^6$

Risque de calcul

$$r = 12 \%$$

Couche de surface

Avec un trafic T2, on retient ici en première approche une couche de surface en béton bitumineux de 6 cm d'épaisseur.

Plate-forme support

Classe de portance PF3.

$$E = 120 \text{ MPa} \quad \nu = 0,35$$

Caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux

La température équivalente des matériaux bitumineux retenue pour l'exemple est de 15 °C.

Les essais de laboratoire ont donné les résultats suivants.

	E(10 °C,10Hz) (MPa)	E(15 °C,10Hz) (MPa)	$\epsilon_6(10 \text{ °C}, 25\text{Hz})$	b	SN
GB classe 3	12 300	9 300	90 10^{-6}	- 0,2	0,30
BB	7 200	5 400	150 10^{-6}	- 0,2	0,25

Coefficient de Poisson des matériaux bitumineux $\nu = 0,35$

Conditions de réalisation

Les interfaces sont toutes collées.

Dispersion sur les épaisseurs des couches

$$\text{Sh BB} = 1 \text{ cm}$$

$$\text{Sh GB} = \min [\max (1; 0,3h - 2); 2,5] \text{ cm}$$

Données de calage

$$\text{BB } k_c = 1,1$$

$$\text{GB } k_c = 1,3$$

----- Valeurs limites admissibles -----

Matériaux non traités. Déformation verticale $\epsilon_{z,ad}$

Sol :

$$\epsilon_{z,ad} = 0,012 (\text{NE})^{-0,222}$$

$$\epsilon_{z,ad} = 433 \cdot 10^{-6}$$

Motériaux bitumineux. Déformation horizontale $\epsilon_{t,ad}$

- Béton bitumineux. Déformation horizontale $\epsilon_{t,ad}$

$$\begin{aligned}\epsilon_{t,ad} &= \epsilon (NE, \theta_{eq}, f) k_r k_c k_s \\ \epsilon (NE, \theta_{eq}, f) &= 150 \cdot 10^{-6} (7200/5400)^{0,5} (3,14 \cdot 10^6/10^6)^{-0,2} \\ &= 138 \cdot 10^{-6}\end{aligned}$$

- $k_r = 10^{-ub\delta}$

risque $r = 12 \%$

$u = -1,175$

$b = -0,2$

$c = 0,02$

$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0,5} = (0,0725)^{0,5} = 0,269$

$$k_r = 10^{-0,0632} = 0,864$$

- $k_c = 1,1$

- $k_s = 1$



$$\epsilon_{t,ad} = 131 \cdot 10^{-6}$$

- Grave-bitume de classe 3. Déformation horizontale $\epsilon_{t,ad}$

$$\epsilon_{t,ad} = \epsilon (NE, \theta_{eq}, f) k_r k_c k_s$$

$$\begin{aligned}\epsilon (NE, \theta_{eq}, f) &= 90 \cdot 10^{-6} (12300/9300)^{0,5} (3,14 \cdot 10^6/10^6)^{-0,2} \\ &= 82 \cdot 10^{-6}\end{aligned}$$

- $k_r = 10^{-ub\delta}$

risque $r = 12 \%$

$u = -1,175$

$b = -0,2$

$c = 0,02$

$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0,5} = 0,391$ (si $h_{GB} \geq 15$ cm)

$$k_r = 10^{-0,091} = 0,810$$

- $k_c = 1,3$

- $k_s = 1$



$$\epsilon_{t,ad} = 86 \cdot 10^{-6} \text{ (si } h_{GB} \geq 15 \text{ cm)}$$

Tableau récapitulatif des valeurs admissibles

BB $\epsilon_{1,ad}$	GB $\epsilon_{1,ad}$	sol $\epsilon_{z,ad}$
131 10^{-6}	86 10^{-6}	433 10^{-6}

 Calcul des contraintes et déformations

Les interfaces surface/base et base/fondation étant collées, il suffit d'examiner la déformation horizontale à la base de la couche de fondation et la déformation verticale en surface du sol support. L'épaisseur de la couche de surface étant fixée à 6 cm de béton bitumineux, l'épaisseur de la grave-bitume est le seul paramètre restant à fixer. Les résultats du calcul sont portés dans le tableau VI.4.5.

Tableau VI.4.5.
Déformations dans la structure de chaussée bitumineuse (calculs de prédimensionnement)

Épaisseur de grave-bitume (en cm)	17	18	19
ϵ_1 à la base de GB (en 10^{-6})	89	84	79
ϵ_z en surface du sol (en 10^{-6})	284	265	248

Ces calculs montrent que la condition sur le sol support n'est pas déterminante ici.

 Dimensionnement

Le calcul indique une épaisseur minimale de 18 cm de grave-bitume. Comme l'épaisseur des couches doit être comprise entre 10 et 15 cm pour une GB 0/20, on est conduit à retenir deux couches de 10 cm soit une épaisseur totale plus forte que ce qui est strictement nécessaire.

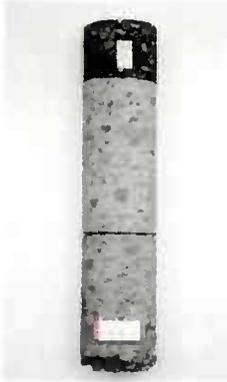
L'obtention d'une couche de fondation de qualité de 10 cm d'épaisseur étant délicate car nécessitant un très bon nivellement de la plate-forme, on peut envisager de reconsidérer le choix fait pour la couche de surface. Une épaisseur plus forte permettrait de réaliser l'assise en grave-bitume en une seule couche de 16 cm au plus.

Le choix d'une couche de surface composée d'une couche de béton bitumineux mince de 4 cm et d'une couche de liaison de 6 cm conduit aux résultats portés dans le tableau VI.4.6.

Tableau VI.4.6.
Déformations dans la nouvelle structure de chaussée bitumineuse (calculs de vérification)

Épaisseur de grave-bitume (en cm)	13	14	15
ϵ_1 à la base de GB (en 10^{-6})	92	86	81
ϵ_z en surface du sol (en 10^{-6})	294	274	257

La solution avec 14 cm de grave-bitume surmontés de 6 cm de BB de liaison et de 4 cm de BB de roulement donne des déformations inférieures aux valeurs admissibles. Cette structure, qui comporte le même nombre de couches que la structure 6BB/10GB/10GB, se prête mieux à l'obtention de bons résultats en réalisation tant en compacité qu'en uni.



4.3. LES CHAUSSEES A ASSISE TRAITEE AUX LIANTS HYDRAULIQUES

La méthode suivante couvre le dimensionnement des chaussées définies en 1.2. comme "à assise traitée aux liants hydrauliques".

4.3.1. Modélisation de la structure de chaussée

On distingue le cas des structures comportant deux couches d'assise de celui des structures ayant une seule couche d'assise en matériau traité aux liants hydrauliques.

• Cas des structures comportant deux couches d'assise

Bien que ces structures soient affectées par la fissuration de retrait (que celle-ci soit ou non contrôlée par préfissuration), pour les assises traitées réalisées de façon classique en deux couches (fondation et base), le calcul de dimensionnement est effectué en assimilant la chaussée à une structure continue. Cette approximation est justifiée entre autres par les observations suivantes :

- il n'y a généralement pas coïncidence dans la localisation de la fissuration de retrait des deux couches,
- la fissuration par fatigue ne se développe pas systématiquement à partir des fissures de retrait.

La chaussée est alors représentée par un ensemble multicouches élastique.

Avec les matériaux traités aux liants hydrauliques présentant une rigidité très élevée, c'est à dire les graves traitées à hautes performances (de classe mécanique G4 et G5) et les bétons compactés, l'effet des discontinuités transversales est pris en compte en majorant par un coefficient multiplicateur les contraintes calculées avec le modèle continu.

Pour les structures de chaussée du réseau routier national du catalogue de 1977, le dimensionnement a été effectué en retenant, par expérience, **pour la couche de fondation, une épaisseur minimale modulée selon le trafic** :

- avec les graves-laitier, graves-cendres volantes, et graves-pauzzalanes-chaux

15 cm en T3 et T2, 18 cm en T1 et T0

- avec les graves-ciment

15 cm en T3, 18 cm en T2, 20 cm en T1 et T0.

Par ailleurs, de manière à éloigner de la surface de la chaussée l'interface entre les couches de base et de fondation, **l'épaisseur de la couche de base est prise au moins égale à celle de la couche de fondation.**

• Cas des structures comportant une seule couche d'assise en matériau traité aux liants hydrauliques

Pour les structures en une seule couche, la schématisation par une structure continue devient sujette à caution. L'accroissement très important des déformations imposées au support au voisinage des discontinuités que représentent les fissures fait des sollicitations sur le support un élément essentiel pour la tenue de ces chaussées. Compte tenu de la difficulté qu'il y a pour appréhender a priori les transferts de charge au droit de ces fissures, une valeur d'épaisseur minimale est imposée, 25 cm pour des matériaux de classe G2 ou G3 pour un trafic cumulé $NE \geq 10^6$. Dans le cas de chaussées à très faible trafic, cette épaisseur minimale peut être réduite jusqu'à 12 cm.

Le dimensionnement des structures préfissurées avec des dispositifs destinés au transfert des charges aux joints est à justifier de façon particulière.

• *Conditions de liaison*

Pour les conditions de liaison entre couches :

- à l'interface couche de roulement - couche de base, si les règles de l'art sont respectées à l'exécution, on tiendra ces deux couches pour collées entre-elles (continuité des déplacements aux interfaces);
- à l'interface couche de base - couche de fondation, la condition à retenir dépend de la nature du liant;
 - avec une **grave-cendres valantes-chaux**, les couches sont à considérer systématiquement comme décollées avec glissement (continuité de la composante normale à l'interface du déplacement et cisaillement nul selon l'interface),
 - avec une **grave-laitier granulé**, les couches seront tenues pour collées (continuité des déplacements et des contraintes),
 - avec les **autres liants**, la nature de la liaison est fortement dépendante des conditions d'exécution. On observe fréquemment certaines discontinuités à l'interface dont l'extension évolue avec le temps. La confrontation entre résultats de calcul et observation du comportement de ces structures montre cependant que l'hypothèse de glissement est trop pessimiste. Pour rendre compte de cette situation intermédiaire de contact, l'artifice usuel de calcul est de retenir pour l'expression des contraintes en base de couche, la demi-somme des valeurs obtenues avec les cas collé et décollé.

Nota : si l'exécution est menée en respectant strictement la condition que les couches de fondation et de base soient réalisées dans le délai de maniabilité du matériau en maintenant la teneur en eau de surface de la couche de fondation, il semble que l'on puisse considérer qu'il y ait conservation dans le temps du collage de l'interface fondation-base. Cependant au stade du projet, il paraît trop aléatoire de tabler sur l'obtention de ces conditions, c'est l'hypothèse de contact précédente qu'il convient de retenir par sécurité.

- l'interface fondation-support est considérée comme collée (sauf en cas de couche de cure à l'émulsion de bitume sur un support traité).

4.3.2. Critères retenus pour le dimensionnement

Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques sont vérifiées par le calcul, vis-à-vis :

- de la rupture par fatigue à la base des couches liées,
- de l'ornièrage du support.

Deux critères sont à vérifier :

- que la contrainte de traction σ_1 à la base des couches traitées aux liants hydrauliques reste inférieure à une valeur admissible. Le niveau à considérer est la base de l'assise traitée, s'il n'y a qu'une couche ou si les couches restent collées; sinon, c'est la base de chaque couche traitée.
- que la déformation verticale ε_z à la surface des couches non liées et du sol support est inférieure à une valeur limite (cf. VI.4.1.).

4.3.3. Détermination de la contrainte de traction $\sigma_{t,ad}$ admissible à la base des couches traitées aux liants hydrauliques

La valeur de $\sigma_{t,ad}$, pour NE chargements, est donnée par la relation :

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_{t,ad} (NE) k_r k_d k_c k_s$$

- $\sigma_t (NE)$: contrainte pour laquelle la rupture en flexion sur éprouvette de 360j est obtenue pour NE chargements.

NE : nombre de chargements équivalents calculé à partir du trafic cumulé et du coefficient d'agressivité CAM comme indiqué en VI.2.1.

Si la loi de fatigue des matériaux traités aux liants hydrauliques peut généralement être représentée par l'expression :

$$\sigma / \sigma_0 = 1 + \beta \log N$$

elle est souvent approchée, par commodité, par une expression de la forme :

$$\sigma_t = A N^b$$

Lorsque le calage est effectué sur les valeurs à 10^5 et 10^7 cycles, β et b sont liés par :

$$b = -0,5 \log [(1 + 5 \beta) / (1 + 7 \beta)]$$

Avec cette approximation, $\sigma_t (N)$ s'exprime sous la forme :

$$\sigma_t (N) = (1 + 6 \beta) (N/10^6)^b \sigma_0$$

Lorsque la chaussée est dimensionnée pour un trafic cumulé hors de l'intervalle $[10^5; 10^7]$, l'ajustement précédent de la loi de fatigue doit être adapté en conséquence.

- k_r est un coefficient qui ajuste la valeur de déformation admissible au risque de calcul retenu en fonction des facteurs de dispersion sur l'épaisseur (écart-type Sh) et sur les résultats des essais de fatigue (écart-type SN)

$$k_r = 10^{-u\beta\delta}$$

u : variable centrée réduite associée au risque r

b : pente de la loi de fatigue du matériau (loi bi-linéaire)

δ : écart-type de la distribution de $\log N$ à la rupture

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0,5}$$

c : coefficient reliant la variation de contrainte à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée, Δh , ($\log \sigma = \log \sigma_0 - c \Delta h$). Avec les structures courantes, c est de l'ordre de $0,02 \text{ cm}^{-1}$.

Pour un risque de calcul de 50 %, $u = 0$ et $k_r = 1$.

- k_d est un coefficient introduit pour prendre en compte l'effet des discontinuités pour la couche de base ; il prend pour valeur :
 - 1/1,25 pour les graves traitées de classe G4 ou G5 et pour le béton compacté,
 - 1 pour les graves traitées de classe G2 ou G3.
- k_c est un coefficient de calage destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement observé de chaussées du même type. Pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, les valeurs retenues selon la nature du matériau sont précisées dans le tableau VI.4.7.

Tableau VI.4.7. – Valeur du coefficient k_c

Matériau	k_c
grave-ciment et grave-liants spéciaux routiers de classe G3	1,4
autres MTLH	1,5

- k_s est un coefficient minorateur tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de portance d'une couche de faible rigidité supportant les couches liées, comme indiqué en 4.2.3. pour les chaussées bitumineuses (tableau VI.4.3.).

4.3.4. Exemples de dimensionnement

- Cas d'une chaussée en grave-ciment

Données

Trafic

MJA = 475 PL/jour avec un taux de croissance géométrique de 7% par an.

Durée initiale : 20 ans

Coefficient d'agressivité moyen du trafic :

- couche de grave-ciment CAM = 1,3
- sol support CAM = 1

Trafic cumulé par voie N = 7,11 10⁶

Nombre d'essieux équivalents

- couche de grave-ciment NE = 9,24 10⁶
- sol support NE = 7,11 10⁶

Risque de calcul

$$r = 5 \%$$

Couche de surface

Avec un trafic T1, la couche de surface retenue est un béton bitumineux de 8 cm d'épaisseur.

Plote-forme support

Classe de portance PF2

$$E = 50 \text{ MPa} \quad \nu = 0,35$$

Caractéristiques mécaniques des matériaux

La température équivalente retenue pour l'exemple est de 15 °C. A cette température et pour 10 Hz :

	E (MPa)	ν	σ_6 ou ϵ_6	b	SN
Grove-ciment	23 000	0,25	0,75 MPa	- 1/15	1
BB	5 400	0,35	150 10^{-6}	- 0,2	0,25

Le béton bitumineux de la couche de surface, réputé collé à la couche de base, est sollicité en compression. Il est donc inutile de vérifier son comportement en fatigue.

Conditions de réalisation

Interfaces :

- couche de roulement-couche de base collée,
- couche de base-couche de fondation, le parfait collage des deux couches n'étant pas assuré, on retient l'artifice de calcul consistant à estimer les sollicitations comme la moyenne des situations extrêmes collée et glissante,
- couche de fondation-support collée.

Dispersion sur les épaisseurs des couches de grove-ciment

$$\text{Sh GC} = 3 \text{ cm}$$

Données de calage

$$\text{Grove-ciment } k_c = 1,4$$

Valeurs limites admissibles• Sol. Déformation verticale $\epsilon_{z,ad}$

$$\begin{aligned} \epsilon_{z,ad} &= 0,012 (NE)^{-0,222} \\ \epsilon_{z,ad} &= 361 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

• Grove-ciment. Contrainte horizontale $\sigma_{t,ad}$

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_t (NE) k_r k_c k_s$$

$$\begin{aligned} \sigma_t (NE) &= \sigma_6 (NE/10^6)^b \\ &= 0,75 (9,243 \cdot 10^6 / 10^6)^{-1/15} \\ &= 0,647 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- $k_r = 10^{-ub\delta}$
 risque $r = 5\%$
 $u = -1,645$
 $b = -1/15$
 $c = 0,02 \text{ cm}^{-1}$
 $\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0,5} = 1,345$

$$k_r = 10^{-0,147} = 0,712$$

- $k_c = 1,4$

couche de base :

$$\begin{aligned}\sigma_{i,ad} &= \sigma_i (NE) k_r k_c \\ &= 0,64 \text{ MPa}\end{aligned}$$

couche de fondation :

- $k_s = 1/1,1$

$$\sigma_{i,ad} = 0,58 \text{ MPa}$$

Tableau récapitulatif des valeurs admissibles

GC	$\sigma_{i,ad}$	Sol	$\epsilon_{z,ad}$
Base :	0,64 MPa		361 10^{-6}
Fondation :	0,58 MPa		

Calcul des contraintes et déformations

Données technologiques

L'épaisseur minimale des couches de grave-ciment est de 15 cm et l'épaisseur maximale de 35 cm.

Étude préliminaire

On examine d'abord si une seule couche d'assise ayant l'épaisseur maximale de 35 cm est suffisante. On obtient $\sigma_i = 0,62 \text{ MPa}$. Il faut donc rechercher une structure comportant deux couches d'assise.

Étude paramétrique

L'épaisseur de la couche de fondation est fixée a priori à 20 cm et l'on fait varier l'épaisseur de la couche de base. La seconde condition : épaisseur de couche de base au moins égale à celle de la couche de fondation, conduit à retenir aussi un minimum de 20 cm pour la couche de base. Les résultats du calcul sont portés dans le tableau VI.4.8.

Tableau VI.4.8.
Calcul des sollicitations dans la structure en grave-ciment

Structure	8/20/20			8/22/20		
	D*	C*	m*	D*	C*	m*
Interface 8/F						
σ_1 base (MPa)	0,90	0,05	0,48	0,85	0,06	0,46
σ_1 fond.(MPa)	0,74	0,51	0,63	0,66	0,47	0,57
$\varepsilon_{z\text{sol}}$ (10^{-6})	136	69		124	63	

*D : interface décollée - C : collée - m : moyenne des cas D et C

Dimensionnement

La condition $\sigma_1 < \sigma_{1,od} = 0,58$ MPa sur la couche de fondation conduit à une épaisseur de 22 cm pour la couche de base avec une couche de fondation de 20 cm.

- Cas d'une chaussée en grave-cendres valantes-chaux

Données

Trafic

Trafic T3 avec un taux de croissance géométrique de 7% par an.
Durée initiale : 20 ans

Coefficient d'agressivité moyen du trafic

- couches de grave-cendres valantes CAM = 1,3
- sol support CAM = 1

Trafic cumulé par voie N = 1,3 10^6

Nombre d'essieux équivalents

- couches de grave-cendres valantes NE = 1,69 10^6
- sol support NE = 1,3 10^6

Risque de calcul

$$r = 12 \%$$

Cauche de surface

Avec un trafic T3, la couche de surface retenue est un béton bitumineux de 6 cm d'épaisseur.

Plate-forme support

Classe de portance PF1.

$$E = 20 \text{ MPa} \quad \nu = 0,35$$

Caractéristiques mécaniques des matériaux

La température équivalente retenue pour l'exemple est de 15 °C. A cette température et pour 10 Hz :

	E (MPa)	ν	σ_6 ou ϵ_6	b	SN
Grave-cendres	30 000	0,25	1,40 MPa	- 1/16	1
BB	5 400	0,35	150 10 ⁻⁶	- 0,2	0,25

Le béton bitumineux de la couche de surface, réputé collé à la couche de base, est sollicité en compression. Il est donc inutile de vérifier son comportement en fatigue.

Conditions de réalisation

Interfaces :

- couche de roulement-couche de base collée,
- couche de base-couche de fondation décollée,
- couche de fondation-support collée.

Dispersion sur les épaisseurs des couches de grave-cendres

$$\text{Sh GCV} = 3 \text{ cm}$$

Données de calage

$$\text{Grave-cendres } k_c = 1,5$$

Valeurs limites admissibles

• Sol. Déformation verticale $\epsilon_{z,ad}$

$$\begin{aligned} \epsilon_{z,ad} &= 0,012 (\text{NE})^{-0,222} \\ \epsilon_{z,ad} &= 530 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

• Grave-cendres volantes-chaux. Contrainte horizontale $\sigma_{t,ad}$

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_t (\text{NE}) k_r k_c k_s k_d$$

$$\begin{aligned} \bullet \sigma_t (\text{NE}) &= \sigma_6 (\text{NE}/10^6)^b \\ &= 1,40 (1,69 \cdot 10^6 / 10^6)^{-1/16} \\ &= 1,35 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bullet k_r &= 10^{-ub\delta} \\ \text{risque } r &= 12 \% \\ u &= -1,175 \\ b &= -1/16 \\ c &= 0,02 \text{ cm}^{-1} \\ \delta &= [\text{SN}^2 + (c^2/b^2) \text{Sh}^2]^{0,5} = 1,386 \end{aligned}$$

$$k_r = 10^{-0,147} = 0,79$$

- $k_c = 1,5$

couche de base :

- $k_d = 1/1,25$



$$\begin{aligned}\sigma_{t,ad} &= \sigma_t (NE) k_r k_c k_d \\ &= 1,28 \text{ MPa}\end{aligned}$$

couche de fondation :

- $k_s = 1/1,2$



$$\begin{aligned}\sigma_{t,ad} &= \sigma_t (NE) k_r k_c k_s \\ &= 1,33 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Tableau récapitulatif des valeurs admissibles

GCV	$\sigma_{t,ad}$	sol	$\epsilon_{z,ad}$
base :	1,28 MPa		530 10^{-6}
fondation :	1,33 MPa		

Calcul des contraintes et déformations

Données technologiques

L'épaisseur minimale des couches de grave-cendres volantes-chaux est de 15 cm et l'épaisseur maximale de 35 cm.

Étude paramétrique

La recherche est faite à partir d'une épaisseur minimale de couche de fondation de 15 cm et de la condition que l'épaisseur de la couche de base soit au moins égale à celle de la couche de fondation. Les résultats du calcul sont portés dans le tableau VI.4.9.

Structure	6/18/18	6/19/19
σ_t base (MPa)	1,32	1,22
σ_t fond.(MPa)	1,16	1,07
ϵ_z sol (10^{-6})	201	184

Dimensionnement

La condition $\sigma_t < \sigma_{t,ad} = 1,28 \text{ MPa}$ sur la couche de base conduit à une épaisseur de 19 cm pour cette couche avec une couche de fondation de 19 cm.



4.4. LES CHAUSSÉES À STRUCTURE MIXTE

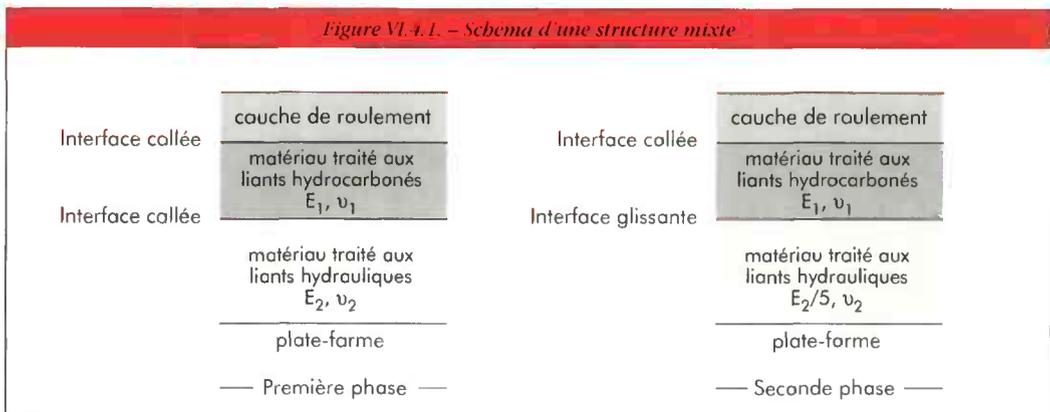
La méthode suivante couvre le dimensionnement des chaussées définies en 1.2. comme "à structure mixte".

L'objectif poursuivi avec les structures mixtes est de ne pas avoir de remontée de fissure en surface pendant la durée de service considérée. Pour cela il faut une valeur minimale du rapport K de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale. Cette épaisseur d'enrobé permet par ailleurs de limiter l'incidence des défauts de transfert de charge au droit des fissures de l'assise traitée aux liants hydrauliques. La valeur de K à retenir doit dépendre du rapport des modules des matériaux hydrocarbonés et traités aux liants hydrauliques, ainsi que de la durée de calcul. Pour une durée de 20 ans, les valeurs de K retenues pour des structures avec couche de base en grave-bitume sont de l'ordre de 0,5. Si cette condition sur K n'est pas vérifiée, la structure de chaussée doit être justifiée comme une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques (cf. 4.3.).

4.4.1. Modélisation de la structure de chaussée

La structure est représentée (fig. VI.4.1.), par un ensemble multicouches élastique. A la mise en service, les couches sont collées (continuité des déplacements aux interfaces). Les elongations dans la couche bitumineuse sont très faibles, ce sont les matériaux de la fondation qui sont les plus sollicités. Après un certain temps, cette couche de matériaux traités aux liants hydrauliques est endommagée par fatigue. Un glissement se produit à l'interface matériaux bitumineux-matériaux hydrauliques et le module de la fondation en matériaux hydrauliques chute ; on retient pour le dimensionnement une valeur résiduelle égale à 1/5^{ème} du module initial. A partir de ce stade, c'est la couche de matériaux bitumineux qui est endommagée par fatigue tandis que la couche de fondation évolue peu.

Figure VI.4.1. – Schéma d'une structure mixte



4.4.2. Critères retenus pour le dimensionnement

Les chaussées à structure mixte sont vérifiées par le calcul, vis-à-vis :

- de la rupture par fatigue à la base des couches bitumineuses et de la couche traitée aux liants hydrauliques,
- de l'orniérage du support.

Les critères à vérifier sont :

- que l'allongement ϵ_1 à la base des couches bitumineuses reste inférieur à une valeur admissible,

- que la contrainte de traction σ_t à la base des couches traitées aux liants hydrauliques reste inférieure à une valeur admissible,
- que la déformation verticale ε_z à la surface du sol support est inférieure à une valeur limite (cf. VI.4.1.).

On vérifie enfin que la condition sur la valeur K du rapport des épaisseurs des couches est satisfaite.

4.4.3. Détermination de l'allongement $\varepsilon_{t,ad}$ admissible à la base des couches bitumineuses

La valeur de $\varepsilon_{t,ad}$ est donnée par la relation :

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) k_r k_c$$

où $\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f)$, k_r et k_c ont les mêmes définitions et expressions que celles données en 4.2.3. pour les chaussées bitumineuses.

La valeur du nombre de chargements équivalents NE est obtenue en retenant pour la couche bitumineuse un coefficient d'agressivité moyen CAM = 0,8 identique à celui pris pour les chaussées bitumineuses.

4.4.4. Détermination de la contrainte de traction $\sigma_{t,ad}$ admissible à la base des couches traitées aux liants hydrauliques

La valeur de $\sigma_{t,ad}$, pour NE chargements, est donnée par la relation :

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_t(NE) k_r k_c k_s$$

où, $\sigma_t(NE)$, k_r , k_c et k_s ont les mêmes définitions et expressions que celles données en 4.3.3. pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.

La valeur du nombre de chargements équivalents NE est obtenue en retenant pour la couche traitée aux liants hydrauliques un coefficient d'agressivité moyen CAM = 1,3 identique à celui pris pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.

4.4.5. Choix des valeurs de risque de calcul pour les chaussées à structure mixte

Dans le cas des structures mixtes conçues tel qu'indiqué plus haut, on considère :

- que les dégradations structurelles observées en surface de la couche de roulement résultent de la détérioration par fatigue de la couche bitumineuse et de la transmission des dégradations par fatigue de la couche de fondation traitée aux liants hydrauliques,
- que le développement de ces deux causes de dégradations s'effectue indépendamment (au moins pour les premiers stades),
- qu'il existe un certain décalage entre l'initialisation de la dégradation de la couche de matériau traité aux liants hydrauliques et l'apparition des dégradations associées en surface de la couche bitumineuse.

De ce fait :

- pour la couche bitumineuse, si l'on appelle r_1 le risque de calcul, on retient la même valeur que celle que l'on

prendrait pour des structures bitumineuses,

- pour la couche de matériau traité aux liants hydrauliques, on retient comme risque de calcul r_2 une valeur supérieure à celle que l'on prendrait pour des structures à assise traitée aux liants hydrauliques, soit en fonction du trafic :

classe de trafic	T0	T1	T2	T3
risque r_2 (%)	3	10	20	35

4.4.6. Exemple de dimensionnement d'une chaussée à structure mixte grave-bitume/grave-laitier granulé

Données

Trafic

Trafic poids lourds T1 (475 poids lourds sur voie lente et par sens à la mise en service) avec un taux de croissance géométrique de 7% par an.

Durée initiale : 20 ans

Trafic cumulé par voie $N = 7,11 \cdot 10^6$

Coefficient d'agressivité moyen du trafic :

- pour la grave-bitume CAM = 0,8,
- pour la grave-laitier CAM = 1,3.

Nombre d'essieux équivalents :

- pour la grave-bitume NE = $5,69 \cdot 10^6$,
- pour la grave-laitier NE = $9,24 \cdot 10^6$.

Risque de calcul

Avec un trafic T1, pour les deux couches de matériaux liés :

matériaux bitumineux $r_1 = 5\%$,
grave-laitier $r_2 = 10\%$.

Couche de surface

Avec un trafic T1, la couche de surface retenue est un béton bitumineux de 8 cm d'épaisseur.

Plate-forme support

Classe de portance PF2.

$$E = 50 \text{ MPa} \quad \nu = 0,35$$

Caractéristiques mécaniques des matériaux

- Matériaux bitumineux

La température équivalente des matériaux bitumineux retenue pour l'exemple est de 15 °C.

	E(10 °C, 10Hz) (MPa)	E(15 °C, 10Hz) (MPa)	$\epsilon_6(10 °C, 25Hz)$	b	SN
GB classe 3	12 300	9 300	$90 \cdot 10^{-6}$	- 0,2	0,30
BB	7 200	5 400	$100 \cdot 10^{-6}$	- 0,2	0,25

Coefficient de Poisson $\nu = 0,35$

- Grave-loitier granulé

	E_t (MPa)	σ_6 (MPa)	b	SN
GLg	15 000	0,60	-1/12,5	1

Après rupture le module apparent de la grave-loitier est divisé par 5, soit 3 000 MPa.

Coefficient de Poisson $\nu = 0,25$

Conditions de réalisation

Les interfaces sont toutes collées à la mise en service. Après rupture de la grave-loitier, l'interface GB/GL est considérée glissante, les autres restent collées.

Dispersion sur les épaisseurs des couches :

$$Sh \text{ BB} = 1 \text{ cm}$$

$$Sh \text{ GB} = \min [\max (1; 0,3h - 2); 2,5] \text{ cm}$$

$$Sh \text{ GL} = 3 \text{ cm}$$

Données de colage

$$\text{BB } k_c = 1,1$$

$$\text{GB } k_c = 1,3$$

$$\text{GL } k_c = 1,5$$

Calcul des contraintes et déformations

Pour un rapport $K = 0,5$ et une épaisseur de couche de surface de 8 cm les épaisseurs de grave-bitume et de grave-loitier sont liées par la relation :

$$h_{GB} = h_{GL} - 8 \text{ (en cm)}$$

Les épaisseurs sont déterminées à partir des calculs suivants.

Considérons la seconde phase de fonctionnement de la chaussée, lorsque la grave-loitier est rompue ($E_{GL} = 4\,000 \text{ MPa}$) et l'interface GL/GB glissante. Pour différentes épaisseurs de la couche de fondation h_{GL} , on calcule σ_1 à la base de la grave-loitier et ϵ_1 à la base de la grave-bitume. La figure VI.4.2. présente la courbe σ_1 en fonction de ϵ_1 , paramétrée selon h_{GL} .

Il faut alors déterminer quel point de cette courbe correspond aux valeurs de contrainte et déformation admissibles pour ces matériaux, compte tenu du trafic. Ceci est fait par approches successives.

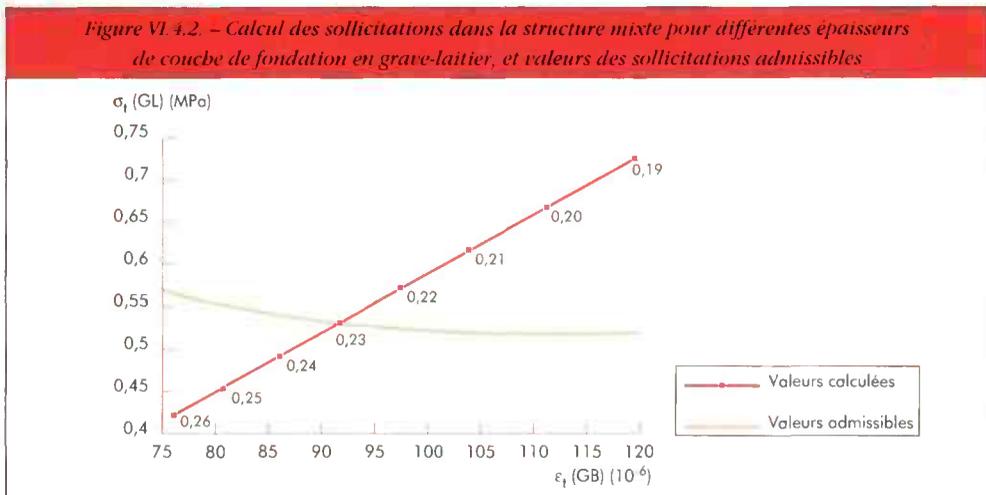
Partant d'une valeur de ϵ_f considérée comme admissible pour la grave-bitume, on détermine le nombre de chargements équivalents NE_{GB} associé qui conduit à la rupture de cette couche pendant la seconde phase de fonctionnement de la chaussée où la couche bitumineuse est sollicitée en traction. De NE_{GB} se déduit le nombre de poids lourds ayant circulé durant cette période ($N2 = NE_{GB} / 0,8$), et par voie de conséquence, le trafic équivalent que doit supporter, en première phase de la vie de la chaussée, la grave-laitier avant de se rompre, soit :

$$NE_{GL} = 1,3 (N - N2)$$

Il reste alors à déterminer la contrainte admissible de la grave-laitier pour ce trafic équivalent NE_{GL} .

Nota : le détail de ces calculs pour une valeur particulière de $\epsilon_{t,od}$ est donné à la fin de cet exemple.

Ce même calcul est répété pour différentes valeurs de ϵ_f , ce qui permet de tracer la courbe $\sigma_{t,od}$ en fonction de $\epsilon_{t,od}$ dont l'intersection avec la première courbe conduit aux valeurs d'épaisseurs recherchées pour la grave-bitume et la grave-laitier. La figure VI.4.2. montre que, du point de vue des sollicitations dans les couches liées, la solution 8 cm de BB/ 15 cm de GB/ 23 cm de GL conviendrait.



Vérification du dimensionnement

Le tableau VI.4.10. regroupe les résultats de calcul importants pour la structure 8 BB/ 15 GB/ 23 GL.

deuxième phase			première phase		
ϵ_f (GB)	$\epsilon_{z,sol}$	N2	σ_t (GL)	$\epsilon_{z,sol}$	N - N2
91 10^{-6}	325 10^{-6}	2,01 10^6	0,52	103 10^{-6}	5,10 10^6

Il reste à vérifier que la déformation du sol support est admissible.

Pendant la première phase, avant rupture de la grave-laitier :

$$\epsilon_{z,od} = 0,012 (5,10 \cdot 10^6)^{0,222} = 389 \cdot 10^{-6}$$

Pendant la seconde phase, après rupture de la grave-laitier :

$$\varepsilon_{z,ad} = 0,012 (2,01 \cdot 10^6)^{-0,222} = 478 \cdot 10^{-6}$$

Les valeurs de déformation du sol restent inférieures aux valeurs admissibles pendant les deux phases. On vérifierait aussi que la solution est acceptable vis-à-vis de l'application du critère de Miner pour le sol.

Détail d'un calcul

Prenons pour exemple une valeur de déformation dans la grave-bitume de :

$$\varepsilon_{t,ad} = 90 \cdot 10^{-6}$$

- $\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon (NE, \theta_{eq}, f) k_r k_c$

- $k_r = 10^{-ub\delta}$

risque r1 = 5 %

$$u = -1,645$$

$$b = -0,2$$

$$c = 0,02$$

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0,5} = 0,39 \text{ (pour } h_{GB} \text{ voisin de 15 cm)}$$

$$k_r = 0,744$$

- $k_c = 1,3$

- ▶ $NE_{GB} = \{\varepsilon_{t,ad} / [\varepsilon_6 (E_{10}/E_B)^{0,5} k_r k_c]\}^{1/b} 10^6$

$$= 1,70 \cdot 10^6$$

- ▶ $N2 = NE_{GB} / 0,8 = 2,13 \cdot 10^6$

Pour la grave-laitier :

$$NE_{GL} = 1,3 (N - N2) = 6,47 \cdot 10^6$$

- $\sigma_{t,ad} = \sigma_t (NE_{GL}) k_r k_c k_s$

- $k_r = 10^{-ub\delta}$

risque r2 = 10 %

$$u = -1,285$$

$$b = -1/12,5$$

$$c = 0,02$$

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0,5} = 1,250$$

$$k_r = 0,744$$

- $k_c = 1,5$

- $k_s = 1/1,1$

- $\sigma_{t,ad} = 0,6 (6,47 \cdot 10^6 / 10^6)^{-1/12,5} \times 0,744 \times 1,5 / 1,1$

- ▶ $\sigma_{t,ad} = 0,52 \text{ MPa}$



4.5. LES CHAUSSÉES À STRUCTURE INVERSE

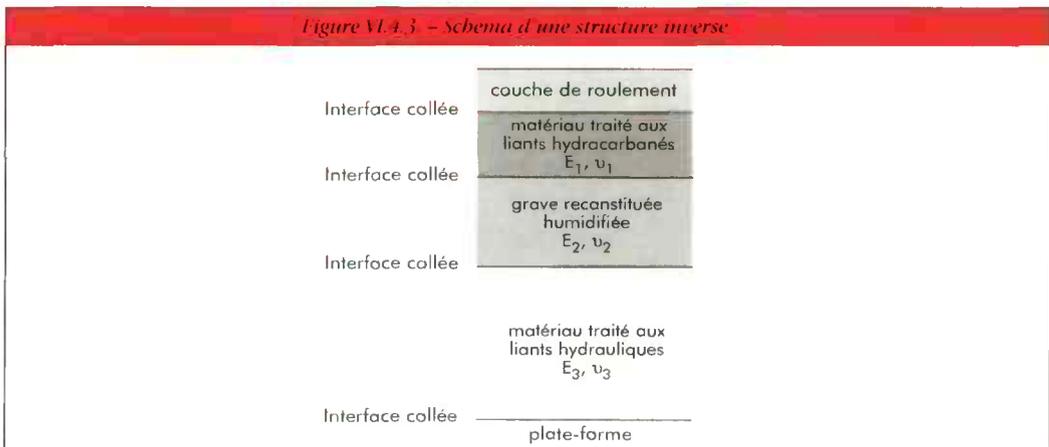
La méthode suivante couvre le dimensionnement des chaussées définies en 1.2. comme "à structure inverse".

4.5.1. Modélisation de la structure de chaussée

La structure est représentée (fig. VI.4.3.), par un multicaouche élastique, les couches étant collées entre-elles (continuité des déplacements aux interfaces).

A défaut de valeurs données par une étude spécifique, le module d'Young de la couche de grave reconstituée humidifiée est pris égal à 480 MPa.

Figure VI.4.3 – Schéma d'une structure inverse



4.5.2. Critères retenus pour le dimensionnement

Les chaussées à structure inverse sont vérifiées par le calcul, vis-à-vis :

- de la rupture par fatigue à la base des couches bitumineuses et de la couche traitée aux liants hydrauliques,
- de l'arniérage du support et de la couche de grave non traitée.

Les critères à vérifier sont :

- que l'allongement ϵ_1 à la base des couches bitumineuses reste inférieur à une valeur admissible,
- que la contrainte de traction σ_1 à la base des couches traitées aux liants hydrauliques reste inférieure à une valeur admissible,
- que les déformations verticales ϵ_2 à la surface de la couche de GRH et du sol support sont inférieures à des valeurs limites (cf. VI.4.1.).

4.5.3. Détermination de l'allongement $\epsilon_{t,ad}$ admissible à la base des couches bitumineuses

La valeur de $\epsilon_{t,ad}$ est donnée par la relation :

$$\epsilon_{t,ad} = \epsilon(NE, \theta_{eq}, f) k_r k_c$$

où, $\varepsilon(\text{NE}, \theta_{\text{eq}}, f)$, k_r et k_c ont les mêmes définitions et expressions que celles données en 4.2.3. pour les chaussées bitumineuses.

A signaler ici que comme la couche bitumineuse repose sur une couche de GRH de module élevé ($> 120 \text{ MPa}$), $k_s = 1$.

Le coefficient de calage k_c prend les valeurs suivantes :

- pour une couche de base en béton bitumineux, $k_c = 1,1$,
- pour une couche de base en grave-bitume, $k_c = 1,3$ si la couche de surface a au moins 4 cm d'épaisseur, sinon $k_c = 1,1$.

Le nombre de chargements équivalents NE est obtenu en retenant pour la couche bitumineuse un coefficient d'agressivité CAM = 0,8.

4.5.4. Détermination de la contrainte de traction $\sigma_{t,ad}$ admissible à la base des couches traitées aux liants hydrauliques

La valeur de $\sigma_{t,ad}$ est donnée par la relation :

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_t(\text{NE}) k_r k_c k_s$$

où, $\sigma_t(\text{NE})$, k_r , k_c et k_s ont les mêmes définitions et expressions que celles données en 4.3.3. pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.

Le coefficient de calage prend, selon le matériau, la valeur donnée en 4.3.3.

Le nombre de chargements équivalents NE est obtenu en retenant pour la couche traitée aux liants hydrauliques un coefficient d'agressivité CAM = 1,3.

4.5.5. Détermination de la déformation verticale admissible $\varepsilon_{z,ad}$ du sol support et de la couche de grave reconstituée humidifiée

Vis-à-vis du sol support, le paragraphe VI.4.1. donne le critère.

Étant donnée la faible épaisseur de la couche intermédiaire de grave reconstituée humidifiée et sa qualité, il est admis au niveau de cette couche une déformation verticale limite $\varepsilon_{z,ad}$ (GRH) supérieure de 20% à celle retenue pour le sol support.

4.5.6. Choix des valeurs de risque de calcul pour les chaussées à structure inverse

Dans le cas des structures inverses conçues tel qu'indiqué en II.1., on considère :

- que les dégradations structurelles observées en surface de la couche de roulement résultent de la détérioration par fatigue de la couche bitumineuse et de la transmission à travers la couche de GRH des dégradations par fatigue de la couche de fondation traitée aux liants hydrauliques ;

- que le développement de ces deux causes de dégradations s'effectue indépendamment (au moins pour les premiers stades);
- qu'il existe un certain délai entre l'initialisation de la dégradation de la couche de matériau traité aux liants hydrauliques et l'apparition des dégradations associées en surface de la couche bitumineuse.

De ce fait :

- pour la couche bitumineuse, si l'on appelle r_1 le risque de calcul, on retient la même valeur que celle que l'on prendrait pour des structures bitumineuses,
- pour la couche de matériau traité aux liants hydrauliques, on retient comme risque de calcul r_2 , une valeur double de celle que l'on prendrait pour des structures à assise traitée aux liants hydrauliques.

4.5.7. Éléments pour un prédimensionnement

D'études paramétriques faites sur les structures inverses il ressort que :

- la contrainte de traction à la base de la grave-ciment est en relation directe avec l'épaisseur totale du corps de chaussée. En considérant en première approximation qu'1 cm de GB est équivalent à 1 cm de GC, ceci permet de déterminer l'ordre de grandeur de l'épaisseur totale de matériau traité ;
- la condition sur l'orniérage du sol support s'avère pratiquement toujours respectée ;
- la condition sur la déformation verticale de la couche de grave reconstituée humidifiée fixe en général l'épaisseur de la couche bitumineuse. Pour une épaisseur bitumineuse fixée, $\epsilon_2(\text{GRH})$ dépend en effet assez peu de l'épaisseur de matériau traité aux liants hydrauliques ;
- le critère de déformation en traction limite à la base de la couche bitumineuse s'avère le plus souvent satisfait quand la condition précédente sur la GRH est vérifiée.

4.5.8. Exemples de dimensionnement

- Cas d'une structure inverse avec fondation en grave-laitier

Données

Trafic

Trafic T2 avec un taux de croissance géométrique de 7% par an.

Durée initiale : 20 ans

Trafic cumulé par voie $N = 2,99 \cdot 10^6$

Coefficient d'agressivité moyen du trafic :

- pour la grave-bitume CAM = 0,8,
- pour la grave-laitier CAM = 1,3.

Nombre d'essieux équivalents :

- pour la grave-bitume NE = $2,39 \cdot 10^6$,
- pour la grave-laitier NE = $3,89 \cdot 10^6$.

Risque de calcul

Avec un trafic T2, pour les deux couches de matériaux liés :

- matériaux bitumineux $r_1 = 12 \%$,
- grave-laitier $r_2 = 15 \%$.

Nota : pour une structure T2PF2 en grave-laitier la valeur du risque de calcul prise aurait été $r = 7,5 \%$.

Couche de surface

Avec un trafic T2, la couche de surface retenue en première approche ici est un béton bitumineux de 6 cm d'épaisseur.

Plate-forme support

Closse de portance PF2.

$$E = 50 \text{ MPa} \quad \nu = 0,35$$

Caractéristiques mécaniques des matériaux

- Matériaux bitumineux

La température équivalente des matériaux bitumineux retenue pour l'exemple est de 15°C .

Les essais de laboratoire ont donné les résultats suivants.

	$E(10^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$ (MPa)	$E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$ (MPa)	$\varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})$	b	SN
GB classe 3	12 300	9 300	$90 \cdot 10^{-6}$	- 0,2	0,30
BB	7 200	5 400			

Coefficient de Poisson $\nu = 0,35$

- Grave-laitier prébroyé, activé ou gypsonot

	E_t (MPa)	σ_6 (MPa)	b	SN
GLp	20 000	0,70	-1/13,7	1

Coefficient de Poisson $\nu = 0,25$

- Grave reconstituée humidifiée

$$E = 480 \text{ MPa}$$

Coefficient de Poisson $\nu = 0,35$

Conditions de réalisation

Les interfaces sont toutes collées.

Dispersion sur les épaisseurs des couches

	BB	GB	GL
Sh (cm)	1	min [max (1; 0,3h-2) ; 2,5]	3

Données de colage

	BB	GB	GL
k_c	1,1	1,3	1,5

Valeurs limites admissibles

Matériaux non traités. Déformation verticale $\varepsilon_{z,ad}$

$$\text{Sol} \quad \varepsilon_{z,ad}(\text{sol}) = 0,012 (\text{NE})^{-0,222} = 438 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{Grove} \quad \varepsilon_{z,ad}(\text{GRH}) = 1,2 \varepsilon_z \text{ sol} = 526 \cdot 10^{-6}$$

Grove-bitume. Déformation horizontale $\varepsilon_{t,ad}$

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon(\text{NE}, \theta_{eq}, f) k_r k_c k_s$$

$$\begin{aligned} \bullet \varepsilon(\text{NE}, \theta_{eq}, f) &= 90 \cdot 10^{-6} (12300/9300)^{0,5} (2,39 \cdot 10^6/10^6)^{-0,2} \\ &= 87 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

$$\bullet k_r = 10^{-ub\delta}$$

risque $r = 12 \%$

$$u = -1,175$$

$$b = -0,2$$

$$c = 0,02$$

$$\delta = [\text{SN}^2 + (c^2/b^2) \text{Sh}^2]^{0,5} = (0,100)^{0,5} = 0,316, \text{ si } h_{GB} \leq 10 \text{ cm}$$

$$k_r = 10^{-0,074} = 0,843$$

$$\bullet k_c = 1,3$$

$$\bullet k_s = 1$$

$$\blacktriangleright \varepsilon_{t,ad} = 95 \cdot 10^{-6}$$

Grove-laitier prébroyé. Contrainte horizontale $\sigma_{t,ad}$

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_t(\text{NE}) k_r k_c k_s$$

$$\begin{aligned} \bullet \sigma_t(\text{NE}) &= \sigma_6 (\text{NE}/10^6)^b \\ &= 0,70 (3,89 \cdot 10^6/10^6)^{-1/13,7} \\ &= 0,63 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- $k_r = 10 \cdot u \cdot b \cdot \delta$
 risque $r = 15 \%$
 $u = -1,036$
 $b = -1/13,7$
 $c = 0,02$
 $\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0,5} = 1,294$

$$k_r = 0,798$$

- $k_c = 1,5$
- $k_s = 1/1,1$

$$\sigma_{t,ad} = 0,69 \text{ MPa}$$

Étude paramétrique

L'épaisseur de béton bitumineux est fixée à 6 cm, celle de GRH à 12 cm. Il reste deux variables, l'épaisseur de grave-bitume h_{GB} et celle de grave-laitier h_{GL} .

Les résultats de calculs effectués pour différentes valeurs de h_{GB} et h_{GL} sont présentés sous forme d'abaques. La figure VI.4.4. présente la variation de la déformation ε_z GRH en fonction de l'épaisseur de grave-bitume pour différentes épaisseurs de la couche de grave-laitier. La figure VI.4.5. montre les variations correspondantes de σ_f (GL).

Figure VI.4.4.

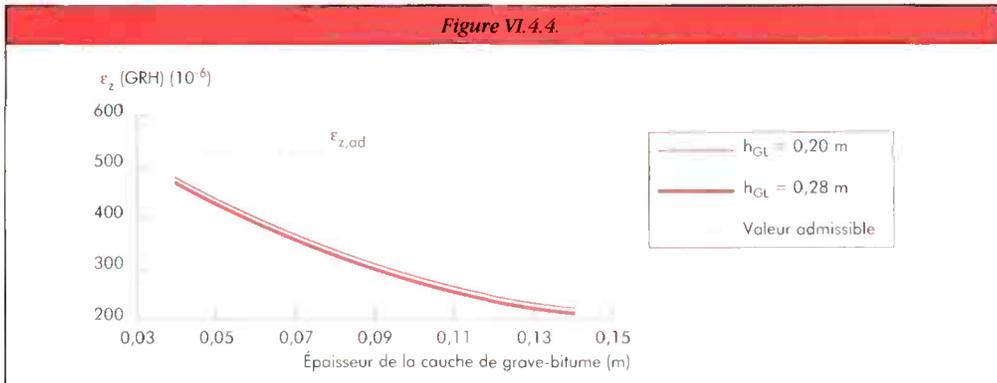
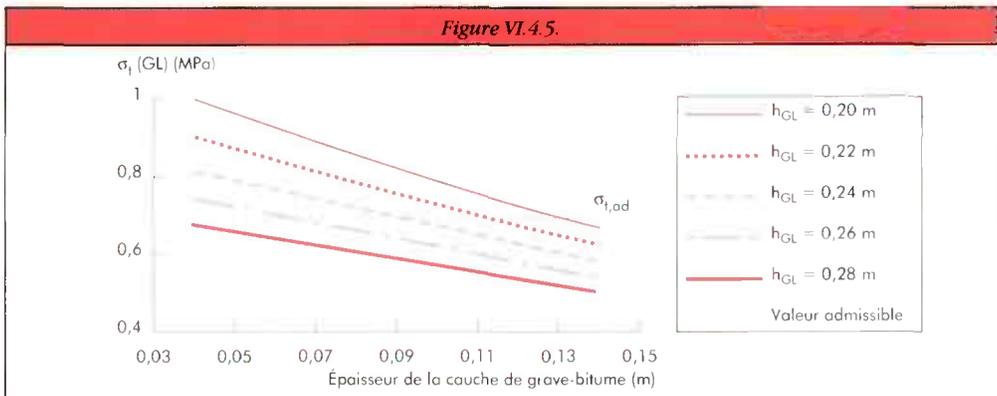


Figure VI.4.5.



Dimensionnement

La figure VI.4.4. montre que la valeur de la déformation verticale de la GRH dépend peu de l'épaisseur de grave-laitier. Le critère sur ε_z (GRH) est satisfait pour une épaisseur de grave-bitume supérieure à 3 cm. Pour la GRH du point de vue de la mise en œuvre, on retiendra une valeur minimale de grave-bitume $h_{GB} = 10$ cm.

D'après la figure VI.4.5., on note que le critère sur la contrainte de traction à la base de la grave-laitier est respecté avec une épaisseur de 24 cm de grave-laitier.

Vérification

Avec la structure 6BB/10GB/12GRH/24GL, le calcul donne les résultats présentés dans le tableau VI.4.11. Par comparaison avec les valeurs admissibles calculées plus haut, on note que la structure satisfait à l'ensemble des critères.

ε_t (GB)	ε_z (GRH)	σ_t (GL)	ε_z (sol)
$63 \cdot 10^{-6}$	$287 \cdot 10^{-6}$	0,67 MPa	$110 \cdot 10^{-6}$

- Cas d'une structure inverse sur plate-forme traitée aux liants hydrauliques

Le cas retenu ici est celui d'une plate-forme de classe de portance à long terme PF4 obtenue par réalisation d'une couche de forme traitée aux liants hydrauliques. Dans cet exemple, on n'examine que le dimensionnement du corps de chaussée. En pratique il convient de plus de s'assurer que les sollicitations induites à la base de la couche de forme traitée sont admissibles compte tenu des caractéristiques mécaniques contrôlées en place de cette couche et du support. Cette vérification est à faire selon les indications données dans la partie IV paragraphe 5.3. et l'annexe A.7.

Données

Trafic

Trafic T0 avec un taux de croissance géométrique de 4% par an.

Durée initiale : 15 ans

Trafic cumulé par voie $N = 8,77 \cdot 10^6$

Coefficient d'agressivité moyen du trafic :

- pour la grave-bitume CAM = 0,8
- pour la GRH CAM = 1

Nombre d'essieux équivalents :

- pour la grave-bitume NE = $7 \cdot 10^6$
- pour la GRH NE = $8,77 \cdot 10^6$

Risque de calcul

Avec un trafic T0 pour les matériaux bitumineux $r = 2 \%$.

Cauche de surface

La cauche de surface retenue en première approche ici est un béton bitumineux de 7 cm d'épaisseur.

Plate-farme support

Classe de portance PF4.

$$E = 200 \text{ MPa} \quad \nu = 0,35$$

Caractéristiques mécaniques des matériaux

- Matériaux bitumineux

La température équivalente des matériaux bitumineux retenue pour l'exemple est de 15°C.

Pour cet exemple, le béton bitumineux a les performances minimales exigées par la norme sur les BBSG ; en revanche la grave-bitume employée ici a des caractéristiques en fatigue supérieures au minima du fait de sa richesse en liant; les essais de laboratoire ont donné les résultats suivants :

	E(10 °C, 10Hz) (MPa)	E(15 °C, 10Hz) (MPa)	$\epsilon_6(10 \text{ °C}, 25\text{Hz})$	b	SN
GB	12 300	9 300	$100 \cdot 10^{-6}$	- 0,2	0,30
BB	7 200	5 400			

Coefficient de Poisson $\nu = 0,35$

- Grave reconstituée humidifiée

$$E = 480 \text{ MPa}$$

Coefficient de Poisson $\nu = 0,35$

Conditions de réalisation

Les interfaces sont collées.

On suppose ici que les conditions d'exécution permettront d'obtenir pour l'épaisseur des couches bitumineuses une dispersion $Sh = 1,5$ cm.

Données de calage

Pour la grave-bitume, $k_c = 1,3$

 Valeurs limites admissibles

Matériaux non traités. Déformation verticale $\epsilon_{z,ad}$

$$\text{Grave } \epsilon_{z,ad} (\text{GRH}) = 1,2 \times 0,012 (\text{NE})^{-0,222} = 414 \cdot 10^{-6}$$

Grave-bitume. Déformation horizontale $\epsilon_{t,ad}$

$$\epsilon_{t,ad} = \epsilon (\text{NE}, \theta_{eq}, f) k_r k_c k_s$$

$$\begin{aligned} \bullet \epsilon (\text{NE}, \theta_{eq}, f) &= 100 \cdot 10^{-6} (12 \cdot 300 / 9 \cdot 300)^{0,5} (7 \cdot 10^6 / 10^6)^{-0,2} \\ &= 78 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

$$\bullet k_r = 10^{-ub\delta}$$

risque $r = 2 \%$

$$u = -2,054$$

$$b = -0,2$$

$$c = 0,02$$

$$\delta = [\text{SN}^2 + (c^2/b^2) \text{Sh}^2]^{0,5} = (0,1125)^{0,5} = 0,335$$

$$k_r = 10^{-0,138} = 0,728$$

$$\bullet k_c = 1,3$$

$$\bullet k_s = 1$$



$$\epsilon_{t,ad} = 74 \cdot 10^{-6}$$

 Dimensionnement

L'épaisseur de béton bitumineux est fixée à 7 cm, celle de GRH à 12 cm. Il reste à déterminer l'épaisseur de grave-bitume.

Avec la structure 7BB/15GB/12GRH, on vérifie par le calcul que les déformations sont admissibles :

$$\epsilon_t (\text{GB}) = 74 \cdot 10^{-6} \leq \epsilon_{t,ad}$$

$$\epsilon_z (\text{GRH}) = 154 \cdot 10^{-6} < \epsilon_{z,ad}$$



4.6. LES CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT

4.6.1. Madélisation de la structure de chaussée

Les phénomènes de retrait affectent les chaussées en béton de ciment sont à l'origine de discontinuités : fissures pour le béton armé continu, joints transversaux pour les structures non armées.

Dans une dalle en béton, les contraintes dues au trafic sont plus importantes lorsque la charge est disposée près des joints transversaux, en coin ou en bord que lorsqu'elle est en milieu de dalle.

Les gradients thermiques provoquent des déformations des dalles, contrariées cependant par le poids propre. Ces sollicitations cycliques sont de très faible fréquence par rapport au trafic ; elles ont cependant un effet de modification et de majoration des contraintes dues aux charges roulantes.

Les contraintes sous charge en milieu de dalle sont calculées en assimilant la chaussée en béton à une structure continue. Les discontinuités transversales et les effets des gradients thermiques sont ensuite pris en compte en majorant les contraintes précédentes par un coefficient dépendant de la qualité du transfert de charges escompté entre dalles pendant la durée de service de la chaussée. Ce coefficient a été déterminé en fonction de la fréquence des gradients thermiques et du cumul des contraintes dues au trafic.

Le calcul est donc effectué sur un multicouches élastique avec les conditions de liaison suivantes :

- l'interface couche de fondation – plate-forme support est considérée comme collée ;
- pour le béton pervibré la couche de base est décollée de son support. Des dispositions sont prises lors de la mise en œuvre pour désolidariser la couche de base de son support (interposition d'une émulsion, d'une feuille de polyane, ou double couche de cure lorsque la fondation est en béton maigre) afin de limiter la fissuration de retrait non contrôlée et de prévenir la remontée de fissures au jeune âge ;
- l'éventuelle couche de roulement en enrobé est collée sur son support.

• Cas particulier des dalles sur couche drainante

Le principe de cette structure, inventé en France, dont les premières applications remontent à 1978 pour des chaussées d'autoroute, est de réunir en une seule couche la base et la fondation des structures traditionnelles. La dalle repose sur une couche drainante en grave 6/20 de 10 cm d'épaisseur environ ou sur un géotextile composite lorsque la couche de base est elle-même traitée au ciment. Le dimensionnement de ces structures a été fait empiriquement, l'épaisseur de la dalle étant choisie pour assurer un engrènement correct au droit des joints et pour limiter les sollicitations sur le sol support. Ceci a conduit à retenir à l'heure actuelle une épaisseur de dalle supérieure à celle que l'on pourrait déduire du calcul des contraintes dans la dalle. Pour le réseau national, pour une durée initiale de 20 ans et un taux de croissance géométrique du trafic de 7 %/an, les épaisseurs retenues sont données dans le tableau VI.4.12.

Tableau VI.4.12. – Épaisseur en cm des dalles de béton sur couche drainante, pour les routes nationales

Trafic Plate-forme	PF1	PF2	PF3
T1 (*)	39	37	35
T2 (**)	37	35	33
T3 (***)	32	30	28

(*) béton de ciment de classe 5 - (**) béton de ciment de classe 4 ou moins - (***) béton maigre possible

4.6.2. Critères retenus pour le dimensionnement

- Les structures avec couche de fondation

Les chaussées en béton avec couche de fondation sont calculées vis-à-vis de la rupture par fatigue de la couche de base et de la couche de fondation, en vérifiant que les contraintes de traction à la base de ces couches sont inférieures aux valeurs admissibles.

Les déformations verticales à la surface de la plate-forme support sont généralement suffisamment faibles pour ne pas être déterminantes dans le dimensionnement.

- Les structures en béton armé continu ou gajonnées sur couche de forme

Lorsque la couche de forme est traitée et de qualité suffisante, la couche de fondation n'est pas nécessaire pour une structure en béton armé continu ou en béton gajonné. La couche de forme est prise en compte dans le calcul de la structure soit par les règles de surclassement données en partie IV, soit par une étude globale couche de forme/chaussée. Les questions d'érodabilité du support sont réglées par la mise en oeuvre d'une couche d'enrobés d'une épaisseur minimale de 5 cm sur la couche de forme.

Le critère à vérifier est que la contrainte de traction à la base de la couche de béton armé continu et de la couche de forme traitée reste inférieure à une valeur admissible.

4.6.3. Détermination de la contrainte de traction admissible $\sigma_{t,ad}$ dans la couche de base en béton

La valeur de $\sigma_{t,ad}$ est donnée par la relation :

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_t (NE) k_r k_d k_c$$

- $\sigma_t (NE)$: contrainte pour laquelle la rupture en traction par fendage est obtenue pour NE chargements.

NE : nombre de chargements équivalents calculé à partir du trafic cumulé et du coefficient d'agressivité CAM comme indiqué en VI 2.1.2.

$$\sigma_t (NE) = \sigma_6 (NE/10^6)^b$$

- k_r est un coefficient qui ajuste la valeur de déformation admissible au risque de calcul retenu en fonction des facteurs de dispersion sur l'épaisseur (écart-type Sh) et sur les résultats des essais de fatigue (écart-type SN)

$$k_r = 10^{-ub\delta}$$

- u : variable centrée réduite associée au risque r
 b : pente de la loi de fatigue du matériau (loi bi-linéaire)
 δ : écart-type de la distribution de $\log N$ à la rupture

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0,5}$$

c : coefficient reliant la variation de contrainte à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée, Δh , ($\log \sigma = \log \sigma_0 - c \Delta h$). Avec les structures courantes, c est de l'ordre de $0,02 \text{ cm}^{-1}$.

- k_d est un coefficient introduit pour prendre en compte les discontinuités des structures des chaussées en béton et l'incidence des gradients thermiques (majoration de la contrainte calculée en milieu de dalle avec le modèle continu). Pour les conditions climatiques en France métropolitaine, on retient pour k_d les valeurs données dans le tableau VI.4.13. Le coefficient n'est appliqué qu'à la couche de base.

Tableau VI.4.13. – Coefficient k_d pour les chaussées en béton

	k_d
Structures non goudonnées et non armées continûment	1 / 1,70
Structures goudonnées	1 / 1,47
Béton armé continu	1 / 1,47

- k_c est un coefficient de calage destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul au compartement observé de chaussées du même type. Pour les chaussées en béton la valeur actuellement retenue pour le coefficient de calage est de 1,5 lorsqu'on utilise la résistance du béton en traction par fendage.

4.6.4. Détermination de la contrainte de traction admissible $\sigma_{t,ad}$ dans la couche de fondation en béton maigre ou en matériaux traités aux liants hydrauliques

La valeur de $\sigma_{t,ad}$ est donnée par la relation :

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_t (NE) k_r k_c k_s$$

où $\sigma_t (NE)$, k_r , k_c et k_s ont les mêmes définitions et expressions que celles données en 4.3.3. pour les chaussées traitées aux liants hydrauliques.

4.6.5. Choix des valeurs de risque pour les chaussées en béton

Pour les chaussées en béton sur couche de fondation on considère que :

- dans un premier stade, les développements des dégradations dans la couche de base et dans la couche de fondation sont indépendants,
- le compartement de la couche de base n'est influencé par la dégradation de la couche de fondation qu'après un certain délai.

Ainsi :

- pour les structures sans dispositif de transfert de charge entre dalles, si r_1 est le risque de calcul retenu pour la couche de base, le risque de calcul retenu pour la couche de fondation est pris égal à $r_2 = 2 r_1$,
- pour les structures en béton armé continu et en béton goudonné, le risque de calcul r_2 est pris égal à 50 %.

4.6.6. Dimensionnement des aciers

La définition, le rôle des aciers ainsi que les tolérances de positionnement sont explicités dans les articles 2.2 et 6.3 de la norme NF P 98-170. L'annexe C de la même norme indique des méthodes pour déterminer les quantités d'acier nécessaires.

- Les fers de liaison

Ces dispositions s'appliquent à toutes les techniques, dalles ou béton armé continu. Les fers de liaison sont mis en place au droit des joints longitudinaux afin de maintenir le joint fermé ; le transfert de charge est alors assuré par l'engrènement des profils latéraux des bandes de béton adjacentes. Leur utilisation est nécessaire pour les joints des dalles de béton reçoivent un trofic supérieur ou égal à T1. Les fers sont placés perpendiculairement au plan formé par le joint, et à mi-épaisseur de la dalle.

Les fers de liaison sont conformes à la norme NF A 35-016 ; l'acier est au moins de nuance Fe-E400 ; leur longueur est égale à 0,60 m.

La section de fers de liaison par mètre de longueur est donnée par la formule :

$$S = (f \ell P) / L_s$$

avec,

f : coefficient de frottement du béton sur le sol support, généralement pris égal à 1,5

ℓ : largeur séparant le joint liaisonné du bord libre le plus proche,

P : poids du revêtement au m²

L_s : contrainte admissible dans l'acier prise égale à 75 % de la limite élastique.

Le diamètre des fers de liaison est choisi à partir de la section S, afin que leur espacement soit compris entre 0,70 et 1 m.

- Les goujons pour chaussées en dalles

Les goujons sont des fers ronds lisses, conformes à la norme NF A 35-015, mis en place au droit des joints transversaux de certaines structures pour assurer le transfert de charge. Ils sont placés parallèlement à l'axe de la chaussée et à mi-épaisseur de la dalle.

L'acier est au moins de nuance Fe-E240. Dimensions et espacement des goujons sont portés dans le tableau VI.4.14.

Tableau VI.4.14. – Caractéristiques des goujons

Épaisseur de dalle (cm)	Diamètre des goujons (cm)	Longueur des goujons (cm)	Espacement des goujons (cm)
13 à 15	2	40	30
16 à 20	2,5	45	30
21 à 28	3	45	30
29 à 40	4	50	40
41 à 50	4,5	55	45

- *Les armatures longitudinales du béton armé continu*

Les armatures longitudinales sont mises en place dans les structures armées continues afin :

- de répartir le retrait du béton,
- de contenir l'ouverture de ces fissures.

Elles sont disposées dans un plan parallèle à la surface de la chaussée :

- au-dessus de la fibre neutre (mi-épaisseur de dalle), dans la zone comprimée sous les charges roulantes,
- à plus de 8 cm de la surface de la chaussée pour éviter la corrosion.

Le rapport ρ des sections d'acier et de béton est fonction de l'adhérence entre les deux matériaux, de la nuance de l'acier et de la résistance en traction du béton. Pour les armatures conformes à la norme NF A 35-016, l'acier sera au moins de nuance Fe-E400. Le rapport ρ est alors égal à :

$$\rho = 0,67 (f_t / 3,3)$$

f_t étant la résistance moyenne en traction par fendage du béton à 28 jours (ou 56 jours si le béton est à prise lente).

Le diamètre des armatures doit être compris entre 12 et 16 mm.

Pour les autres types d'armatures non conformes à la norme NF A 35-016, comme les fers plats crantés Fe-700 (44 mm x 2,15 mm hors crans) il était retenu un rapport ρ de 0,34. Cette valeur apparaît quelque peu insuffisante compte tenu de la forme du profil pour respecter la condition précédente sur l'ouverture des fissures. Des études se poursuivent pour augmenter les caractéristiques d'adhérence.

4.6.7. Exemple de dimensionnement : chaussée en béton armé continu sur fondation en béton moigre

Données

Chaussée bidirectionnelle de 8 m de large, avec un joint longitudinal en milieu de chaussée.

Trafic

MJA = 475 PL/jour avec un taux de croissance géométrique de 7% par an.

Durée initiale : 20 ans

Trafic cumulé par voie $N = 7,10 \cdot 10^6$

Coefficient d'agressivité moyen du trafic CAM = 1,3

Nombre d'essieux équivalents NE = $9,24 \cdot 10^6$

Risque de calcul

Couche en BAC $r_1 = 5 \%$

Couche de fondation $r_2 = 50 \%$

Couche de surface

Les caractéristiques de surface nécessaires sont obtenues par un traitement de surface de la couche de BAC.

Plate-forme support

Classe de portance PF2.

$$E = 50 \text{ MPa} \quad \nu = 0,35$$

Caractéristiques mécaniques des matériaux

- Béton

Le béton de ciment de la couche de BAC correspond à la classe de résistance 5 de la norme ($f_t = 3,3 \text{ MPa}$).

Le béton maigre de la couche de fondation correspond à la classe 3 de la norme pour présenter une résistance suffisante à l'érodabilité ($f_t = 2,0 \text{ MPa}$).

	E (MPa)	σ_6 (MPa)	b	SN
Béton	35 000	2,15	- 1/16	1
Béton maigre	24 000	1,63	- 1/15	1

Coefficient de Poisson $\nu = 0,25$

Conditions de réalisation

Interface couche de base/couche de fondation décollée.

Interface couche de fondation/support collée.

Dispersion sur les épaisseurs des couches :

- Sh = 1 cm pour la couche de base ,
- Sh = 3 cm pour la couche de fondation.

Données de colage

$$k_c = 1,5$$

- Aciers

Fers de liaison de nuance Fe-E400 de longueur 60 cm.

Armatures longitudinales de nuance Fe-E400, conformes à la norme NF A 35-016, et de 16 mm de diamètre.

Valeurs limites admissibles

- Béton de la couche de base

$$\sigma_{i,ad} = \sigma_t (NE) k_r k_d k_c$$

- $\sigma_t (NE) = 2,15 \times 9,24^{-1/16} = 1,87 \text{ MPa}$

- $k_r = 10^{-ub\delta}$
 risque $r = 5\%$
 $u = -1,645$
 $b = -1/16$
 $c = 0,02$
 $\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0,5} = 1,050$

$$k_r = 0,78$$

- $k_d = 1/1,47$

- $k_c = 1,5$

► $\sigma_{i,od} = 1,49 \text{ MPa}$

- Béton de la couche de fondation

$$\sigma_{i,od} = \sigma_f(NE) k_r k_c k_s$$

- $\sigma_f(NE) = 1,63 \times 9,24^{-1/15} = 1,41 \text{ MPa}$

- $k_r = 1$

- $k_c = 1,5$

- $k_s = 1/1,1$

► $\sigma_{i,od} = 1,92 \text{ MPa}$

Dimensionnement des couches de béton

L'épaisseur de la couche de fondation est fixée a priori à l'épaisseur minimale recommandée soit 15 cm pour un trafic T1 sur 20 ans. Les calculs à partir du modèle continu conduisent aux résultats donnés dans la première partie du tableau VI.4.15.

La contrainte dans la couche de fondation est très inférieure à la valeur admissible. Par rapport à la solution comportant 22 cm en couche de base, le coût du béton de fondation étant moindre que celui de la couche de base, on peut chercher si une structure avec une couche de fondation plus épaisse ne serait pas plus économique. Les valeurs du tableau VI.4.15. montrent que la structure optimale est composée de :

- 20 cm de béton de ciment en couche de base,
- sur 17 cm de béton maigre en couche de fondation.

Tableau VI.4.15. – Contraintes dans le béton de la structure en BAC

Épaisseur couche de fondation (cm)	15		16		17	
	Épaisseur couche de base (cm)	21	22	20	21	19
Contrainte à la base couche de base (MPa)	1,48	1,40	1,49	1,43	1,49	1,44
Contrainte à la base couche de fondation (MPa)	0,72	0,66	0,80	0,74	0,88	0,81

Détermination des armatures

Armatures longitudinales

Le pourcentage de section d'acier est égal à :

$$\rho = 0,67 f_t / 3,3 = 0,67 \%$$

La section de béton étant $8 \times 0,21 \text{ m}^2$, la section d'acier est:

$$A_s = 800 \times 21 \times 0,0067 = 112,56 \text{ cm}^2$$

soit 56 barres $\varnothing 16 \text{ mm}$ réparties sur la largeur de la chaussée, avec un espacement de 15 cm.

Fers de liaison

La section d'acier par mètre linéaire de joint longitudinal est :

$$S = f \ell / P / L_s$$

$$f = 1,5$$

$$\ell = 4 \text{ m}$$

$$P = 0,21 \times 2400 \times 10 = 5,04 \text{ kPo}$$

$$L_s = 300 \text{ MPo}$$



$$S = 1,01 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

Afin de respecter une distance entre fers de liaison comprise entre 0,7 m et 1 m, on retiendra un fer $\varnothing 10 \text{ mm}$ tous les 0,80 m.

5 . VÉRIFICATION AU GEL/DÉGEL

La vérification au gel-dégel consiste à comparer :

- l'indice de gel atmosphérique choisi comme référence, IR, qui caractérise la rigueur de l'hiver dont on souhaite protéger la chaussée,
- et l'indice de gel atmosphérique que peut supporter la chaussée, appelé indice de gel admissible IA. Cet indice s'évalue en fonction de la sensibilité au gel du sol support, de la protection thermique et du rôle mécanique du corps de chaussée.

Selon l'importance attachée à la continuité du service de la route :

- on conçoit la structure de chaussée pour que l'indice de gel admissible IA de la chaussée soit supérieur à l'indice de gel de référence IR ;
- au l'on accepte que l'inégalité $IA > IR$ ne soit pas assurée, auquel cas on pourra être conduit à la pose de barrières de dégel pour préserver la chaussée lors du dégel.

5.1. CHOIX DE L'HIVER DE RÉFÉRENCE

Le choix de l'hiver de référence est lié à la politique suivie par le gestionnaire du réseau. De ce choix dépend la fréquence de pose de barrières de dégel, donc d'interruption de la circulation sur l'itinéraire.

5.2. CALCUL DE L'INDICE DE GEL ADMISSIBLE

La détermination de l'indice de gel admissible de la chaussée s'effectue par le cheminement suivant qui mène du sol support à la surface de la chaussée :

Première étape – Examen de la sensibilité au gel de la plate-forme support de chaussée

On détermine :

- la protection thermique, traduite par la quantité de gel Q_{ng} , apportée par les matériaux non gélifs de la couche de forme et du sol support ;
- la quantité de gel Q_g dont on autorise la transmission aux couches inférieures gélives du support.

Deuxième étape – Analyse de nature mécanique

En acceptant que la structure de chaussée, établie sur un support gélif, subisse un surcroît de dommage limité pendant les périodes de dégel, on peut admettre une certaine pénétration du gel dans le support gélif. On associe à cette dernière la quantité de gel Q_M .

Troisième étape – Détermination de la quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme

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

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

Quatrième étape – étude de la protection thermique apportée par la structure de chaussée

L'étude de la transmission du gel au travers la structure de chaussée permet de déterminer la relation entre l'indice de gel de surface IS et l'indice de gel transmis à la base de la chaussée It = f(IS).

Cinquième étape – Détermination de l'indice de gel atmosphérique admissible IA pour la structure de chaussée

La quantité de gel Q_{PF} admissible ou niveau de la plate-forme détermine l'indice de gel qui peut être transmis à la base de la structure de chaussée, ces deux grandeurs étant liées par :

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

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

5.2.1. Examen de la sensibilité au gel de la plate-forme support de chaussée

• Sensibilité au gel des matériaux

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

0,05		0,40		Pente de l'essai de gonflement (mm/(°C.h) ^{1/2})
SGn		SGp		SGt

avec SGn : les matériaux non gélifs
SGp : les matériaux peu gélifs
SGt : les matériaux très gélifs

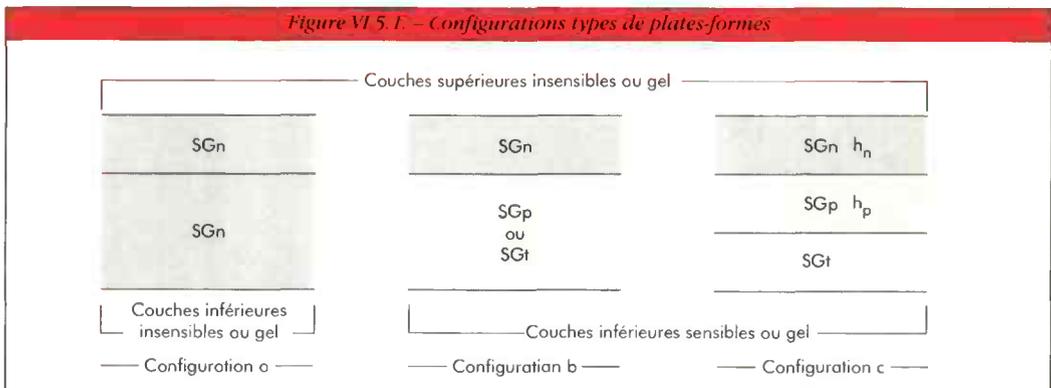
• Découpage de la plate-forme

La plate-forme (sol support et couche de forme) est découpée en couches telles que la sensibilité au gel soit croissante avec la profondeur. C'est-à-dire, si une couche de matériaux est située sous une couche plus gélive, on lui affecte la même sensibilité au gel que la couche supérieure (ainsi, des matériaux peu gélifs situés sous des matériaux très gélifs seront assimilés à des matériaux très gélifs).

Ceci conduit à trois configurations de plate-forme (figure VI.5.1), pour lesquelles on distingue ainsi les couches inférieures peu ou très gélives des couches supérieures (d'épaisseur éventuellement nulle) insensibles au gel.

Le cas (a) ne pose pas de problème de tenue au gel/dégel.

Figure VI.5.1. – Configurations types de plates-formes



- Quantité de gel admissible Q_g transmise aux matériaux gélifs du support

Pour les cas de support comportant des couches sensibles au gel, la quantité de gel admissible Q_g à la surface de ces matériaux gélifs est déterminée comme suit.

Dans le cas (b), la quantité de gel admissible est fixée selon la sensibilité au gel du matériau par la relation:

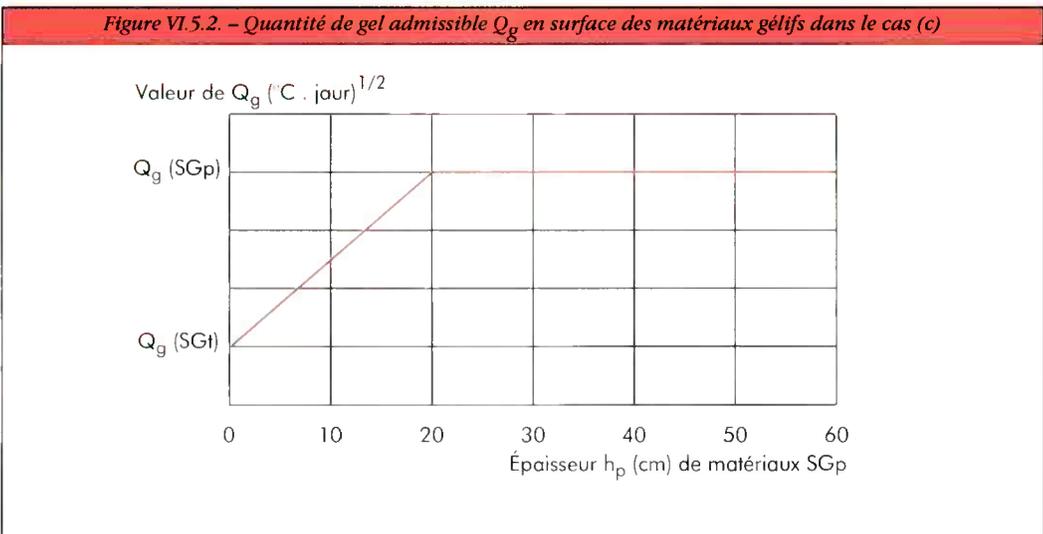
$$Q_g = \begin{cases} 4 & \text{si } 0,05 < p \leq 0,25 \\ 1/p & \text{si } 0,25 < p \leq 1 \\ 0 & \text{si } p > 1 \end{cases}$$

Q_g quantité de gel admissible en surface des couches gélives [(°C.jour)^{1/2}] ;
 p pente obtenue à l'essai de gonflement [mm/(°C.heure)^{1/2}]

Remarque : Cela revient à accepter un gonflement du matériau limité à 5 mm.

Dans le cas (c), la quantité de gel admissible Q_g dépend de l'épaisseur h_p de matériaux peu gélifs comme indiqué par la figure VI.5.2.

Figure VI.5.2. – Quantité de gel admissible Q_g en surface des matériaux gélifs dans le cas (c)



- Protection thermique, Q_{ng} , apportée par les matériaux non gélifs de la plate-forme

La protection thermique apportée par les matériaux non gélifs de la plate-forme est fonction de leur nature et de leur épaisseur.

La valeur de Q_{ng} [en (°C.jour)^{1/2}] est donnée par la formule :

$$Q_{ng} = A_n h_n^2 / (h_n + 10)$$

avec,

h_n épaisseur de la couche non gélive en cm

A_n coefficient dépendant de la nature du matériau de couche de forme (voir tableau VI.5.1).

Tableau VI.5.1. – Valeurs des coefficients A_n

Matériau	A	B et C	D	LTCC	CV, SC, SL
A_n ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour}$) ^{1/2} /cm	0,15	0,13	0,12	0,14	0,17

A, B, C et D sont les classes de sol non traité définies par la norme (NF P 11-300) et le guide technique *Réalisation des remblais et des couches de forme*.

5.2.2. Analyse mécanique

La chute de portance ou dégel des matériaux gélifs du support alimentés en eau engendre, dans le corps de chaussée, des sollicitations plus fortes que celles observées en période normale.

Avec des chaussées épaisses (couches liées d'épaisseur totale supérieure à 20 cm), on pourra admettre une certaine pénétration du gel dans les couches gélives du support, en limitant l'accroissement des sollicitations qui en résulte durant les périodes de dégel. Ceci conduit à accepter que soit transmise au niveau de la plate-forme support une certaine quantité de gel, notée Q_M , en plus des termes Q_g et Q_{ng} définis précédemment.

Cette quantité Q_M est déterminée selon la démorche précisée ci-après.

Pour les chaussées peu épaisses (couches liées d'épaisseur inférieure à 20 cm), il ne sera pas fait de vérification mécanique ; Q_M est tenu pour nul.

• Principe

La vérification du compartement mécanique de la structure en phase de dégel est faite en limitant à 5 % l'accroissement des sollicitations dans la structure de chaussée, par rapport à la situation en période normale hors gel/dégel. Pour la phase de dégel, le calcul est effectué avec les hypothèses suivantes :

- le module de la couche dégelée de la plate-forme est pris égal à $E(PFi)/10$;
- le module du reste du support est celui de la plate-forme en période hors gel/dégel ;
- les interfaces supérieure et inférieure de la couche dégelée sont collées ;
- les caractéristiques mécaniques de la couche de sol dégelé sont prises constantes pendant toute la durée du dégel.

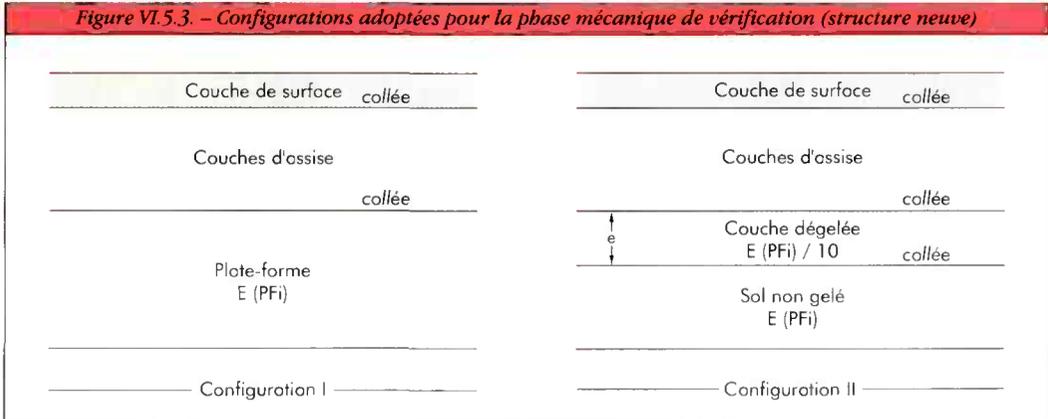
Toutes les autres données du problème (modules, conditions d'interface) sont conformes aux valeurs habituellement adoptées pour les calculs de dimensionnement.

• Modélisation de la structure

La structure est définie sous deux configurations (figure VI.5.3) :

- la première est celle de la structure en fonctionnement courant, sur un sol non dégelé (notée configuration I) ;
- la seconde correspond à la présence d'une couche de sol dégelé (notée configuration II).

Figure VI.5.3. – Configurations adoptées pour la phase mécanique de vérification (structure neuve)



• Démarche du calcul

On détermine par itération l'épaisseur, e , de sol dégelé conduisant dans la configuration II à des sollicitations supérieures d'environ 5% à celles obtenues dans la configuration I. Cette épaisseur e est transcrite en une quantité de gel \sqrt{I} transmise au niveau de la plate-forme en phase de gel, par la relation :

$$\sqrt{I} = e/10 \quad (e \text{ en cm})$$

Cette quantité de gel \sqrt{I} est notée Q_M .

5.2.3. Quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme

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

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

5.2.4. Étude de la protection thermique apportée par la structure de chaussée

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

- celle qui procède d'un calcul thermique de propagation du gel dans la chaussée ;
- l'utilisation de relations simplifiées.

• Calcul de propagation du gel à travers la chaussée

La propagation du gel au sein de la chaussée est étudiée à l'aide d'un code de calcul numérique (par exemple le code de calcul aux différences finies GEL1D du LCPC [40]) écrit à partir du modèle de Fourier. L'utilisation de ce type de programme nécessite :

- une description de la géométrie de la structure et des caractéristiques thermiques de chacune des couches ;
- la définition de conditions aux limites sur les températures imposées ;
- le choix d'une loi d'évolution dans le temps de la température en surface de la chaussée.

Description de la structure

Pour les caractéristiques thermiques, les valeurs adoptées pour les calculs ayant servi à la vérification des structures du catalogue 1977 sont indiquées dans le tableau VI.5.2 pour chaque famille de matériau. Le sol retenu pour effectuer un calcul "standard" est le sol de type A avec une teneur en eau de 32%.

Tableau VI.5.2 – Caractéristiques adoptées pour les matériaux de chaussée et le sol pour le calcul de la propagation du front de gel dans une structure de chaussée

Désignation	ρ (kg/m ³)	W (%)	λ_{ng} (W/m. °C)	λ_g (W/m. °C)
BB	2 350	1	2,00	2,10
GB	2 350	1	1,90	1,90
SB	1 990	5,5	1,50	1,70
GL	2 150	4	1,40	1,50
SL	1 900	7	1,10	1,30
GC	2 250	3	1,80	1,90
SC	1 900	8	1,42	1,66
CV	1 350	14	0,60	0,93
GCV	2 250	5	1,90	2,10
GP _z	2 150	4	1,10	1,20
Béton	2 300	3	1,70	1,90
GNT	2 200	4	1,80	2,00
Sol A	1 300	32	1,10	1,80

BB béton bitumineux	GCV grave-cendres volantes	SC sable-ciment
CV grave-cendres volantes	GNT grave non traitée	SL sable-laitier
GB grave-bitume	GP grave-pauzzolanes	λ_{ng} conductivité thermique du matériau non gelé
GC grave-ciment	SB sable-bitume	λ_g conductivité thermique du matériau gelé

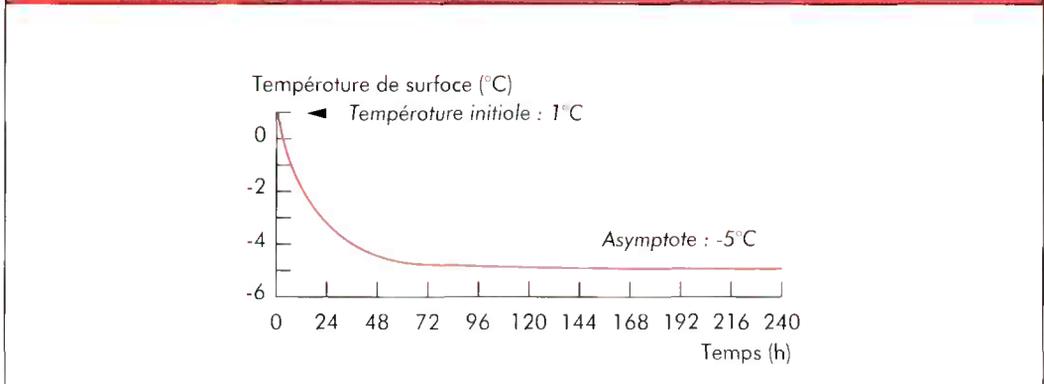
Conditions aux limites sur les températures

Les conditions initiales de température imposées à la chaussée sont définies par le profil suivant : la température est de 1°C en surface de la chaussée et varie linéairement jusqu'à 14 °C à 10 m de profondeur sous la surface de la plate-forme; elle est maintenue égale à 14 °C au-delà de cette profondeur.

Loi d'évaluation de la température de surface

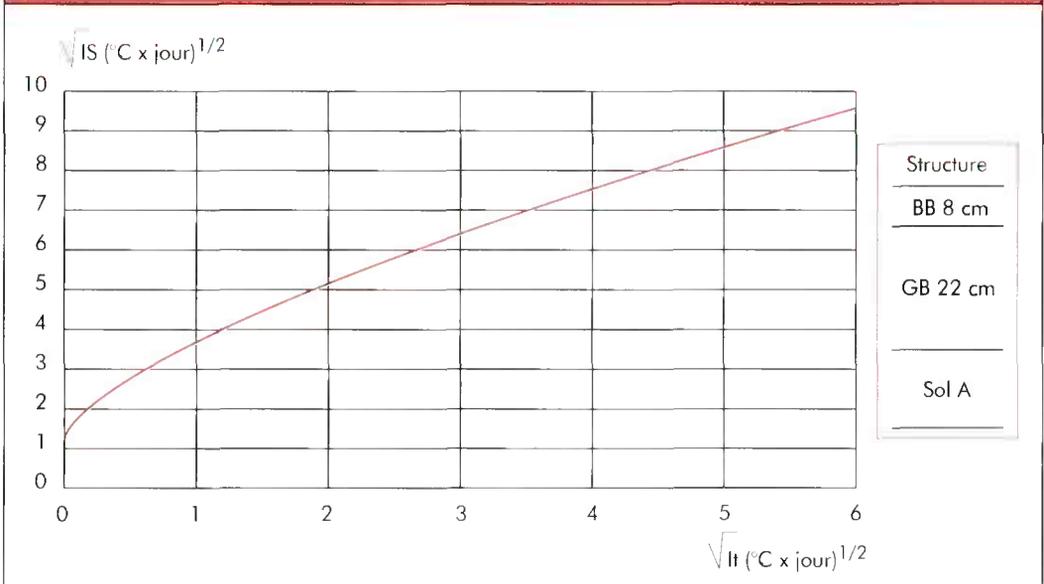
La température de surface évolue dans le temps suivant une loi hyperbolique (figure VI.5.4) de pente initiale égale à -0,833 °C/h.

Figure VI.5.4. – Loi d'évolution de la température de surface

Calcul

Le calcul thermique permet de déterminer la relation entre l'indice de gel de surface, noté IS, et l'indice de gel transmis à la base de la structure de chaussée. Un exemple-type est fourni par la figure VI.5.5. qui se rapporte à une chaussée comportant 22 cm de grave-bitume.

Figure VI.5.5. – Relation entre IS indice de gel de surface et It indice de gel transmis



• Méthode simplifiée

A partir de calculs du type précédent, les résultats en sont simplifiés en linéarisant la relation entre \sqrt{IS} et \sqrt{It} .

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

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

a et b étant des coefficients dépendant de la nature du matériau et dont les valeurs sont données dans le tableau VI.5.3. Si l'on se réfère à la figure VI.5.5, bh correspond à l'ordonnée à l'origine ($\sqrt{li} = 0$) et $(1 + ah)$ représente la pente en régime établi.

Tableau VI.5.3. – Valeurs des coefficients a et b (en °C.jour)^{1/2} / cm

Matériaux	BB-GB	BC-GC-GL-GNT-GE	GCV	LTCC	SL-SC
a	0,008	0,008	0,012	0,012	0,012
b	0,06	0,10	0,13	0,14	0,15

Dans le cas d'une structure de chaussée constituée de plusieurs couches de matériaux différents, les valeurs de a et b de la relation précédente s'obtiennent à partir des expressions :

$$a = \left(\sum_i a_i h_i \right) / \left(\sum_i h_i \right)$$

$$b = \left(\sum_i b_i h_i \right) / \left(\sum_i h_i \right)$$

h_i épaisseur de la couche i

a_i et b_i coefficients associés au matériau de la couche i

5.2.5. Détermination de l'indice de gel atmosphérique admissible IA

- Relation entre indice de gel de surface et indice de gel atmosphérique

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

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

avec,

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

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

Pour tous les autres cas (gel très rigoureux, ensoleillement important), une étude particulière est nécessaire.

- Indice de gel admissible IA

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

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

avec

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

A partir du calcul thermique ou de la relation approchée entre \sqrt{IS} et \sqrt{It} donnée précédemment, on détermine la valeur de IS associée à Q_{PF} .

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

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

5.3. EXEMPLE DE CALCUL DE VÉRIFICATION AU GEL/DÉGEL

Données

• Structure et plate-forme support

On considère une structure en grave-bitume 6BB/13GB/13GB reposant sur une plate-forme PF2 constituée d'un limon argileux surmonté de 50 cm de couche de forme en grave alluvionnaire (classée D21) non traitée.

L'essai de cryosuccion sur le limon argileux donne une valeur de pente :

$$p = 0,3 \text{ mm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{h})^{1/2}$$

• Caractéristiques thermiques

	ρ	w	λ_{ng}	λ_g	a	b
	(kg/m ³)	(%)	(W/m.°C)	(W/m.°C)	[(°C.jour) ^{1/2} /cm]	[(°C.jour) ^{1/2} /cm]
BB	2 350	1	2,0	2,1	0,008	0,06
GB	2 350	1	1,9	1,9	0,008	0,06
Sol	1 330	32	1,1	1,8	–	–

Couche de forme :

$$A_n = 0,12 \text{ (}^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour)}^{1/2}/\text{cm}$$

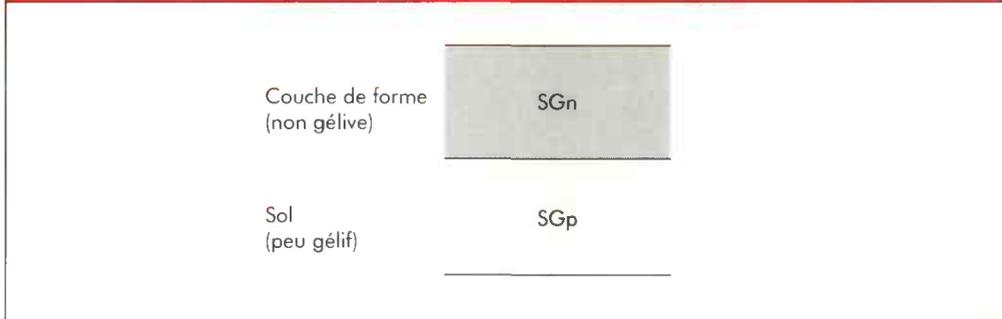
Démarche de calcul de l'indice de gel admissible

Première étape – Examen de la sensibilité au gel de la plate-forme support de chaussée

Le sol limoneux est classé peu gélif (SGp) en raison de la valeur de la pente p à l'essai de gonflement. La grave de la couche de forme est quant à elle non gélive (SGn).

En découpant la plate-forme en couches de gélivité croissante avec la profondeur, on obtient la configuration suivante (figure VI.5.6.) :

Figure VI.5.6. – Découpage de la plate-forme support



La quantité de gel admissible Q_g en surface des couches gélives est égale à :

$$Q_g = 1/\rho = 3,3 \text{ (}^\circ\text{C.jour)}^{1/2}$$

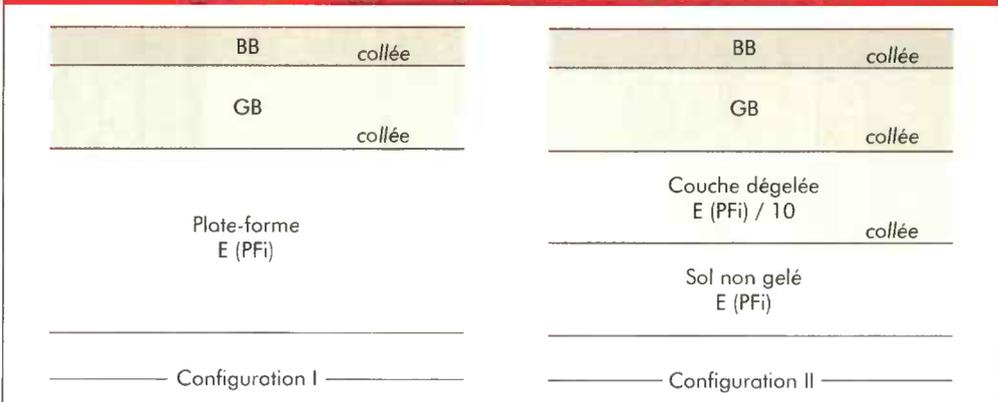
La protection thermique apportée par la couche de forme est :

$$\begin{aligned} Q_{ng} &= 0,12 \times 50^2 / (50 + 10) \\ &= 5 \text{ (}^\circ\text{C.jour)}^{1/2} \end{aligned}$$

Deuxième étape – Analyse de nature mécanique

La structure est représentée en situation normale et au dégel par les deux configurations :

Figure VI.5.7. – Configurations pour la vérification de la tenue au dégel



On obtient par le calcul :

$$\sigma_{\perp} = 0,850 \text{ MPa}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \sigma_{\parallel} &= 1,05 \times 0,850 \\ &= 0,892 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Par itérations successives, on trouve que l'épaisseur e de couche dégelée qui donne la valeur de contrainte σ_{II} à la base de la couche de fondation en GB est de 4,0 cm. Ceci correspond à une quantité de gel $Q_M (= e/10)$:

$$Q_M = 0,4 (\text{°C.jour})^{1/2}$$

Troisième étape – Détermination de la quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme

$$\begin{aligned} Q_{PF} &= Q_g + Q_{ng} + Q_M \\ &= 3,3 + 5,0 + 0,4 \\ &= 8,7 (\text{°C.jour})^{1/2} \end{aligned}$$

Quatrième et cinquième étapes – Étude de la protection thermique apportée par la structure de chaussée et détermination de l'indice de gel atmosphérique admissible IA pour la structure de chaussée

– Méthode simplifiée

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

avec

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

$$a = (\sum_i a_i h_i)/h$$

$$b = (\sum_i b_i h_i)/h$$

$$ah = 0,008 \times 6 + 0,008 \times 26 = 0,256 (\text{°C.jour})^{1/2}$$

$$bh = 0,06 \times 6 + 0,06 \times 26 = 1,920 (\text{°C.jour})^{1/2}$$

donc

$$\begin{aligned} \sqrt{IS} &= 1,256 \times 8,7 + 1,92 \\ &= 12,85 (\text{°C.jour})^{1/2} \end{aligned}$$

Par suite

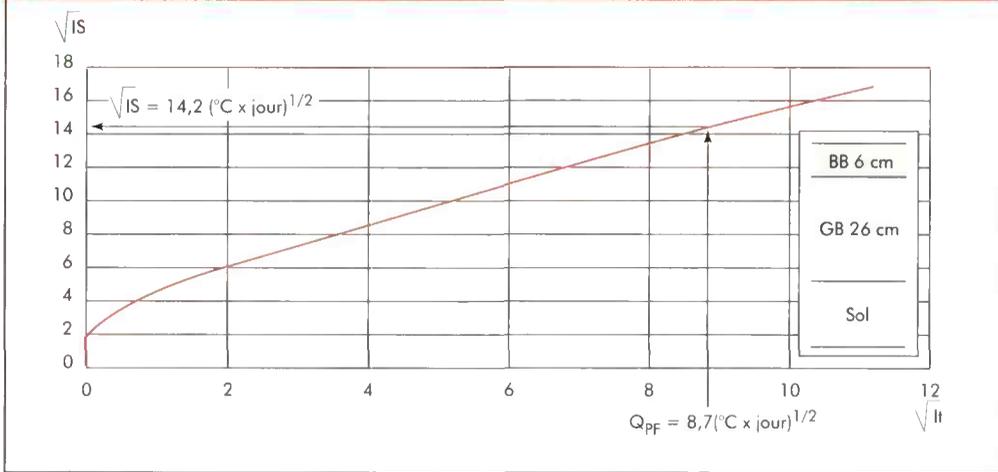
$$IA = (\sqrt{IS})^2 / 0.7 + 10 = 246 \text{ °C.jour}$$

– Calcul thermique détaillé

Le programme GELID [40] donne entre la quantité de gel en surface de la structure (\sqrt{IS}) et la quantité de gel transmise à la base de la structure (\sqrt{lt}) la relation présentée par la figure VI.5.8.

Figure VI.5.8.

Relation entre la quantité de gel en surface de la chaussée et la quantité de gel transmise à la base



On en déduit, pour une quantité de gel transmise égale à Q_{PF} :

$$\sqrt{I_S} = 14,2 (\text{°C} \cdot \text{jour})^{1/2}$$

Par suite

$$I_A = (\sqrt{I_S})^2 / 0,7 + 10 = 298 \text{ °C} \cdot \text{jour}$$

6. DÉFINITION DE LA COUPE TRANSVERSALE DE LA CHAUSSEE

Les structures définies à l'issue des vérifications précédentes sont les structures nominales au bord de la voie la plus chargée, côté rive, à l'intérieur de la bande de guidage latéral. La voie la plus chargée est généralement la voie de droite pour les chaussées jusqu'à trois voies dans un même sens de circulation.

Il reste à préciser la coupe transversale de la chaussée en tenant compte des caractéristiques géométriques du projet, des dispositifs d'assainissement de la plate-forme et de la chaussée, des équipements liés à l'exploitation, des contraintes associées aux matériaux, matériels et techniques de mise en oeuvre, ainsi que des possibilités d'entretien ultérieur.

Des indications sont données dans le guide technique *Établissement des coupes transversales de chaussées* [8]. Le présent chapitre ne donne que des éléments synthétiques tirés de ce document.

La coupe transversale est définie en examinant les aspects suivants qui font chacun l'objet d'une partie de ce chapitre :

- caractéristiques géométriques,
- construction de la plate-forme support de chaussée,
- constitution des chaussées, accotements et terre-pleins centraux,
- coordination des pentes transversales.

6.1. CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES

Les caractéristiques géométriques sont définies lors des études préliminaires qui précisent la fonction économique de l'ouvrage projeté. Pour le profil en travers, il s'agit :

- des largeurs des chaussées, accotements, terre-plein central, des dispositifs d'assainissement superficiel,
- des pentes transversales en alignement et en courbe, des chaussées et des bandes d'arrêt,
- de la position du point de rotation du dévers qui définit la ligne de référence au ligne rouge du profil en long.

Pour le réseau routier national, ces éléments sont arrêtés conformément à des Instructions sur les conditions techniques d'aménagement (ICTA) :

- IARP pour les routes nationales [10],
- ICTAAL pour les autoroutes de liaison [7],
- ICTAVRU pour les voies rapides urbaines [9].

6.2. CONSTRUCTION DE LA PLATE-FORME SUPPORT DE CHAUSSEE

Seul est considéré ici le cas des plates-formes dérasées.

6.2.1. Profil en travers de la plate-forme support de chaussée

Le choix d'un ou deux points hauts de plate-forme et de leur position en profil en travers dépend des caractéristiques géométriques du projet (chaussée bidirectionnelle, route à chaussées séparées avec terre-plein central revêtu ou non) et du tracé (alignement ou courbes).

La pente transversale est à choisir selon la sensibilité à l'éou de la partie supérieure des terrassements, PST, et de la nature de la couche de forme. Elle peut être quelconque (on accepte des zones plates dans les introductions de dévers) ou avoir une valeur minimale pour favoriser le ruissellement et limiter les infiltrations dans la PST (cf. tableau VI.6.1.).

Tableau VI.6.1. – Pente transversale minimale conseillée pour la plate-forme support de chaussée

Couche de forme	Cas de PST			
	PST n°1	PST n°2	PST n°3	PST n°4, 5 ou 6
Néont	(*)	(*)	4 %	2 %
En matériaux non traités	4 %	4 %	2 %	2 %
En matériaux traités ou liants hydrauliques	(*)	quelconque	quelconque	quelconque
(*) Cos non considéré				

6.2.2. Largeur de la couche de forme

Côté extérieur, si la couche de forme est en matériau non traité, elle est généralement réalisée jusqu'au bord de la plate-forme. Dans le cas d'une couche de forme en matériaux traités, la sur largeur par rapport au bord de la couche de roulement peut être limitée à 1,50 m s'il n'y a pas de bande d'arrêt, sinon à 3 m.

Côté terre-plein central, lorsqu'il existe, la couche de forme est :

- réalisée sur tout le TPC, s'il a moins de 5 m de large,
- limitée à une sur largeur de 1,50 m dans le cas contraire.

6.3. CONSTITUTION DES CHAUSSEES, ACCOTEMENTS ET TERRE-PLEINS CENTRAUX

6.3.1. Sur largeur des couches de chaussée

- Structures bitumineuses ou à assise traitée aux liants hydrauliques

Par rapport à la largeur nominale de la chaussée, il est adopté une sur largeur de la couche de roulement bitumineuse de 30 cm de chaque côté.

Pour assurer des conditions correctes d'exécution, chaque couche de chaussée présente, par rapport à la couche qu'elle supporte, une sur largeur dont la valeur est précisée dans le tableau VI.6.2. pour les routes nationales.

Tableau VI.6.2. – Sur largeurs des couches de chaussées par rapport à la base de la couche supérieure

Position	Couche	Sur largeur
Côté droit	fondation	20 cm
	base	20 cm ou 10 cm*
Côté TPC	liaison	10 cm
	fondation	0
	base	20 cm
	liaison	0

* 10 cm s'il y a une couche de liaison

- *Chaussées en béton*

Afin de réduire les sollicitations dans la dalle, il est donné une surlargeur à la dalle en fonction du trafic, comme indiqué dans le tableau VI.6.3.

La couche de fondation présente, elle, une surlargeur par rapport à la dalle :

- côté droit, 30 cm pour une fondation en grave traitée aux liants hydrauliques, 10 cm pour du béton maigre ;
- côté TPC, 10 cm.

*Tableau VI.6.3.
Surlargeur en m de la dalle pour les chaussées en béton*

	T0 – T1	T2	T3
Côté droit	0,75	0,50	0,25
Côté TPC	0,25	0,25	0,25

6.3.2. Épaisseur des couches de chaussée

Pour les routes bidirectionnelles à deux voies, les épaisseurs des couches sont constantes ; les pentes transversales des couches d'assise sont donc égales à celle de la couche de roulement.

Pour des routes à chaussées séparées à plusieurs voies de circulation, des variations transversales d'épaisseur des couches d'assise sont possibles, dans les limites suivantes.

- L'épaisseur nominale de l'assise, au bord gauche, ne doit pas être inférieure à :
 - 20 cm en sable traité aux liants hydrauliques (classes A et B),
 - 18 cm en béton de ciment et assise en grave-cendres volantes-chaux,
 - 15 cm en grave traitée aux liants hydrauliques, en grave non traitée, et en sable traité aux liants hydrauliques (classe C et D),
 - 10 cm en grave-bitume 2/20 et 8 cm en grave-bitume 0/14.

- La différence ΔH entre les épaisseurs nominales droite et gauche (au droit des bandes de guidage), ne doit pas dépasser :

– dalle de béton :

sur fondation	$\Delta H = 5$ cm
sans fondation	$\Delta H = 10$ cm

– couche de base :

$T \geq T1$	$\Delta H = 0$ cm
$T \leq T2$	$\Delta H = 3$ cm pour GB 5 cm pour GH et SH

– couche de fondation :

$\Delta H = 3$ cm pour GB 0/20 et 2 cm pour GB 0/14
$\Delta H = 5$ cm pour graves hydrauliques et béton maigre
$\Delta H =$ variable selon l'épaisseur avec les sables traités aux liants hydrauliques (cf : tableau VI.6.4.)

Tableau VI.6.4. – Variation d'épaisseur pour une couche de fondation en sable traité

Épaisseur de sable traité (cm)	≤ 30	31-35	36-40	> 40
ΔH (cm)	5	6	8	10

Pour les chaussées séparées ayant ou moins trois voies de circulation, une étude particulière est nécessaire, avant d'appliquer les règles précédentes, afin de préciser la répartition du trafic poids lourds.

Les conditions géométriques et les règles de variation transversale d'épaisseur des couches d'assise déterminent, pour la plate-forme support, la **pente transversale optimale théorique** .

6.4. COORDINATION DES PENTES TRANSVERSALES

Lorsque la pente de la plate-forme support de chaussée peut être quelconque, elle est réglée à la pente optimale théorique.

Quand la plate-forme doit être réglée selon une pente différente afin de la protéger des dégradations dues au ruissellement, il faut adopter un procédé de rattrapage entre les pentes des terrassements finis et celles des couches de chaussée. Différents procédés sont possibles :

- apport d'une sous-couche de chaussée,
- traitement du support de chaussée,
- remodelage du profil de la plate-forme,
- accroissement de l'épaisseur de la couche de fondation.

Le choix entre ces solutions doit être le résultat d'une étude intégrant la faisabilité technique, le coût et l'intérêt dans l'optique d'une optimisation du couple chaussée – plate-forme.



ANNEXE 1 GLOSSAIRE DE L'ENSEMBLE DES NOTATIONS

Les notations et abréviations sont regroupées par thème :

- Matériaux,
- Paramètres de dimensionnement,
- Support de chaussée,
- Essais et grandeurs mesurées,
- Trafic,
- Tenue au gel/dégel.

MATÉRIAUX

BAC	béton armé continu
BB	béton bitumineux
BBC	béton bitumineux clouté
BBDr	béton bitumineux drainant
BBL	béton bitumineux de liaison
BBM	béton bitumineux mince
BBME	béton bitumineux à module élevé
BBS	béton bitumineux pour chaussée souple à faible trafic
BBSG	béton bitumineux semi-grenu
BBTM	béton bitumineux très mince
BBUM	béton bitumineux ultra-mince
BC	béton de ciment
BCg	béton de ciment goujanné
BCR	béton compacté routier
Bm	béton maigre
CV	cendres volantes
ECF	enrabé coulé à froid
EME	enrabé à module élevé
ES	enduit superficiel
GB	grave-bitume
GC	grave-ciment
GCV	grave-cendres volantes
GE	grave-émulsion

GH	grave traitée aux liants hydrauliques
GL	grave-laitier
GNT	grave non traitée (de type "A" ou "B")
GPz	grave-pauzzalanes-chaux
GRH	grave reconstituée humidifiée (GNT de type "B")
LTCC	limon traité à la chaux et au ciment
MTLH	matériaux traités aux liants hydrauliques
SC(α)	sable traité au ciment, de classe mécanique α
SL(α)	sable traité au laitier, de classe mécanique α

PARAMETRES DE DIMENSIONNEMENT

b	pente de fatigue du matériau exprimée sous forme d'une loi bi-logarithmique
c	coefficient associant la variation de déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée Δh (m^{-1})
E	module d'Young (MPa)
E(θ, f)	module d'Young à la température θ et à la fréquence f (MPa)
f	fréquence (Hz)
f_f	résistance en flexion sur éprouvette trapézoïdale (MPa)
f_t	résistance en traction par fendage, "essai brésilien" (MPa)
k_c	coefficient de calage
k_d	coefficient tenant compte des discontinuités des structures de chaussées rigides et de l'incidence des gradients thermiques pour les chaussées en béton
k_r	coefficient ajustant la valeur de déformation ou de contrainte admissible en fonction du risque de calcul et des facteurs de dispersion
k_s	coefficient de prise en compte d'hétérogénéités locales de portance de la couche non liée sous-jacente
K	rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale (structure mixte)
p	période de calcul (années)
r	risque de calcul
Sh	écart-type sur l'épaisseur de la couche de matériaux mise en œuvre (m)
SN	écart-type sur le logarithme du nombre de cycles entraînant la rupture par fatigue
u	variable aléatoire de la loi normale centrée réduite associée au risque r
β	pente de fatigue du matériau exprimée sous forme d'une loi semi-logarithmique
δ	écart-type combinant la dispersion sur les épaisseurs et celle des résultats des essais de fatigue
$\epsilon_{1,ad}$	déformation horizontale admissible en traction
$\epsilon_{z,ad}$	déformation verticale admissible en compression
ϵ_1	déformation en traction/compression maximale dans le plan horizontal
ϵ_z	déformation verticale maximale
ϵ_6	déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de 10^6 cycles avec une probabilité de 50%, à 10 °C et 25 Hz
$\epsilon_6(\theta, f)$	déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de 10^6 cycles avec une probabilité de 50%, à θ °C et pour une fréquence f
$\epsilon(N, \theta, f)$	déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de N cycles avec une probabilité de 50%, pour la température θ et la fréquence f
ν	coefficient de Poisson
$\nu(\theta, f)$	coefficient de Poisson à la température θ et à la fréquence f

θ	température de calcul (°C)
θ_{eq}	température équivalente (°C)
$\sigma_{t,ad}$	contrainte admissible en traction à la base d'une couche (MPa)
σ_t	contrainte en traction/compression maximale dans le plan horizontal (MPa)
σ_6	contrainte pour laquelle la rupture par traction en flexion sur éprouvette de 360 jours est obtenue pour 10^6 cycles (MPa)
$\sigma_t(N)$	contrainte pour laquelle la rupture par traction en flexion sur éprouvette de 360 jours est obtenue pour N chargements (MPa)

SUPPORT DE CHAUSSÉE

A, B, C, D, R, F	classes des sols et matériaux racheux (cf. guide technique <i>Réalisation des remblais et des couches de forme</i> [19])
ARi	classe de portance à long terme de l'arase de terrassement
PFi	classe i de portance à long terme de la plate-forme support de chaussée
PST	partie supérieure des terrassements

ESSAIS ET GRANDEURS MESURÉES

APL	analyseur de profil en long
CFL	coefficient de frottement longitudinal
CFT	coefficient de frottement transversal
PCG	presse à cisaillement giratoire
A	coefficient d'aplatissement
CBR	indice de portance californien (California Bearing Ratio) (%)
C_{pA}	coefficient de polissage accéléré
d	diamètre des plus petits éléments d'un matériau
D	diamètre des plus gros éléments d'un matériau
ES	équivalent de sable
E_c	module sécant à 30% de la résistance en compression simple (MPa)
E_t	module sécant à 30% de la résistance en traction directe (MPa)
EV_2	module à la plaque au second cycle de chargement
HS_v	hauteur au sable vraie
I_c	indice de concassage
I_p	indice de plasticité (%)
IPI	indice de portance immédiate au indice partant immédiat (%)
L_A	coefficient Las Angeles (%)
M_{DE}	coefficient micro-Deval, en présence d'eau (%)
OPN	optimum proctor normal
OPM	optimum proctor modifié
r	résistance à la compression simple après immersion (MPa) à l'essai Duriez
R	résistance à la compression simple avant immersion (MPa) à l'essai Duriez
R_c	résistance en compression simple (MPa)

R_f	résistance à la flexion (MPa)
R_t	résistance à la traction directe (MPa)
VB_{1a}	valeur de bleu de méthylène, à la tache (g de bleu pour 100 g de fines)
VBS	valeur de bleu de méthylène du sol (g de bleu pour 100 g de sol)
w	teneur en eau (%)
w_l	limite de liquidité (%)
w_p	limite de plasticité (%)
ρ_s	masse volumique des grains (g/cm^3)
ρ	masse volumique (kg/m^3)

TRAFFIC

CAM	coefficient d'agressivité moyenne du poids lourd par rapport à l'essieu de référence
N	nombre cumulé de véhicules sur la période de calcul retenue
NE	nombre équivalent d'essieux de référence correspondant au trafic poids lourds cumulé sur la durée de calcul retenue
MJA	moyenne journalière annuelle
PL	poids lourd (véhicule de charge utile supérieure ou égale à 50 kN)
τ	taux annuel de croissance géométrique du trafic (%)
t	trafic journalier moyen, par sens de circulation, à la mise en service
T_i	classe de trafic à la mise en service

TENUE AU GEL/DÉGEL

h_n	épaisseur des matériaux non gélifs de la plate-forme (m)
h_p	épaisseur des matériaux peu gélifs de la plate-forme (m)
HE	hiver exceptionnel
HR	hiver rigoureux non exceptionnel
I_{Atm}	indice de gel atmosphérique ($^{\circ}C \cdot jour$)
IA	indice de gel admissible de la chaussée ($^{\circ}C \cdot jour$)
IR	indice de gel de l'hiver de référence ($^{\circ}C \cdot jour$)
IS	indice de gel de surface ($^{\circ}C \cdot jour$)
I_t	indice de gel transmis à la base de la structure ($^{\circ}C \cdot jour$)
p	penne obtenue à l'essai de gonflement [$(mm/(^{\circ}C \cdot heure))^{1/2}$]
Q_{PF}	quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme [$(^{\circ}C \cdot jour)^{1/2}$]
Q_g	quantité de gel transmise aux couches de sol gélives [$(^{\circ}C \cdot jour)^{1/2}$]
Q_{ng}	protection thermique apportée par les matériaux non gélifs de la couche de forme et du sol support [$(^{\circ}C \cdot jour)^{1/2}$]
Q_M	quantité de gel transmise aux couches de sol gélives, correspondant à un surcroît de dommage limité de la structure de chaussée [$(^{\circ}C \cdot jour)^{1/2}$]
$SG\alpha$	classe de sensibilité au gel : SG_n : matériau non gélif SG_p : matériau peu gélif SG_t : matériau très gélif
λ_g	conductivité thermique du sol gelé ($W/m \cdot ^{\circ}C$)
λ_{ng}	conductivité thermique du sol non gelé ($W/m \cdot ^{\circ}C$)



ANNEXE 2 NORMES D'ESSAIS ET DE PRODUITS

Numéro	Titre de la norme	État Déc. 1994	Date version
	NORMES GÉNÉRALES		
NF P 11-300	Exécution des terrassements Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières	Homologuée	09/92
NF P 98-080	Chaussées-Terrassement Terminologie – Partie 1 Terminologie relative au calcul de dimensionnement de chaussée	Homologuée	11/92
NF P 98-082	Chaussées-Terrassement Dimensionnement des chaussées routières Détermination des trafics routiers pour le dimensionnement des structures de chaussée	Homologuée	01/94
NF P 98-086	Chaussées-Terrassement Dimensionnement des chaussées routières Éléments à prendre en compte pour le dimensionnement des chaussées	Homologuée	12/92
NF P 98-114-1	Assises de chaussée Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques Graves traitées aux liants hydrauliques	Homologuée	12/92
NF P 98-114-2	Assises de chaussée Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques Sables traités aux liants hydrauliques	Homologuée	10/94
NF P 98-115	Assises de chaussée Exécution des corps de chaussée Constituants, composition des mélanges et formulation, exécution et contrôle	Homologuée	01/92

Numéro	Titre de la norme	État Déc. 1994	Date version
NF P 98-150	Enrobés hydrocarbonés Exécution des corps de chaussée Couches de roulement et de liaison Constituants, composition des mélanges, exécution et contrôles	Homologuée	12/92
NF P 98-160	Revêtements de chaussée Enduits superficiels d'usure Spécifications	Homologuée	03/94
NF P 98-170	Chaussées en béton de ciment Exécution, suivi et contrôle Spécifications	Homologuée	04/92
NORMES PRODUITS DE CHAUSSÉE (TECHNIQUES ROUTIERES)			
NF P 98-113	Assises de chaussée Sables traités aux liants hydrauliques et pouzzolaniques Définitions, composition, spécifications	Homologuée	11/94
NF P 98-116	Assises de chaussée Graves-ciment Définitions, composition, spécifications	Homologuée	07/91
NF P 98-117	Assises de chaussée Graves pouzzolanes-chaux Définitions, composition, spécifications	Homologuée	07/91
NF P 98-118	Assises de chaussée Graves-laitier Définitions, composition, spécifications	Homologuée	07/91
NF P 98-119	Assises de chaussée Graves-cendres volantes-chaux Définitions, composition, spécifications	Homologuée	07/91
NF P 98-120	Assises de chaussée Graves-cendres hydrauliques Définitions, composition, spécifications	Homologuée	03/92
NF P 98-121	Assises de chaussée Graves-émulsion Définitions, classification, caractéristiques, mise en œuvre	Homologuée Révisée	11/93
NF P 98-122	Assises de chaussée Graves-liant spécial routier Définitions, spécifications	Homologuée	11/91
NF P 98-123	Assises de chaussée Graves-laitier-cendres volantes-chaux Définitions, composition, spécifications	Homologuée	11/92
NF P 98-124	Assises de chaussée Graves-cendres volantes-chaux-gypse Définitions, composition, spécifications	Homologuée	11/92

Numéro	Titre de la norme	État Déc. 1994	Date version
NF P 98-128	Assises de chaussée Bétons compactés routiers et graves traitées aux liants hydrauliques et pouzzoloniques à hautes performances Définitions, spécifications	Homologuée	11/91
NF P 98-129	Assises de chaussée Graves non traitées Définitions, spécifications	Projet	
NF P 98-130	Enrobés hydrocarbonés Couche de liaison et de roulement Bétons bitumineux semi-grenus Définitions, classification, caractéristiques, mise en œuvre	Homologuée	11/91
NF P 98-132	Enrobés hydrocarbonés Bétons bitumineux minces Définitions, classification, caractéristiques, mise en œuvre	Homologuée Révisée	07/94
NF P 98-133	Enrobés hydrocarbonés Bétons bitumineux cloutés Définitions, classification, caractéristiques, mise en œuvre	Homologuée	11/91
NF P 98-134	Enrobés hydrocarbonés Bétons bitumineux drainants Définitions, classification, caractéristiques, mise en œuvre	Homologuée	12/91
NF P 98-136	Enrobés hydrocarbonés Bétons bitumineux pour couche de surface de chaussée à faible trafic Définitions, classification, caractéristiques, mise en œuvre	Homologuée	11/91
NF P 98-137	Enrobés hydrocarbonés Bétons bitumineux très minces Définitions, classification, caractéristiques, mise en œuvre	Homologuée	05/92
NF P 98-138	Enrobés hydrocarbonés Graves-bitume Définitions, classification, caractéristiques, mise en œuvre	Homologuée Révisée	10/92
NF P 98-139	Enrobés hydrocarbonés Bétons bitumineux à froid Définitions, classification, caractéristiques, mise en œuvre	Homologuée	01/94
NF P 98-140	Enrobés hydrocarbonés Enrobés à module élevé Définitions, classification, caractéristiques, mise en œuvre	Homologuée Révisée	10/92
NF P 98-141	Enrobés hydrocarbonés Bétons bitumineux à module élevé Définitions, classification, caractéristiques, mise en œuvre	Homologuée	10/92
NF P 98-145	Enrobés hydrocarbonés Asphaltes coulés pour trottoirs et couches de roulement de chaussée Définitions, classification, caractéristiques, mise en œuvre	Homologuée	10/92

Numéro	Titre de la norme	État Déc. 1994	Date version
NORMES RELATIVES AUX COMPOSANTS DES PRODUITS			
NF A 35-015	Armatures pour béton armé Ronds lisses	Homologuée	07/84
NF A 35-016	Armatures pour béton armé Barres et fil machine à haute adhérence	Homologuée	12/86
NF P 15-301	Liants hydrauliques – Ciments courants Composition, spécifications et critères de conformité	Homologuée Révisée	06/94
P 18-101	Gronulats Définitions et classifications	Exp.	11/90
NF P 18-103	Adjuvants pour béton, mortiers et coulis Définitions, classification et marquage	Homologuée	08/89
NF P 18-301	Granulats naturels pour béton hydraulique	Homologuée	12/90
NF P 18-501	Addition pour bétons hydrauliques Fillers	Homologuée	03/92
NF P 98 100	Assises de chaussée Eaux pour assises Classification	Homologuée	11/91
NF P 98-101	Assises de chaussée Chaux aériennes calciques pour sols et routes Spécifications	Homologuée	07/91
NF P 98-103	Assises de chaussée Pauzzolanes Spécifications	Homologuée	07/91
NF P 98-106	Assises de chaussée Laitiers de haut-fourneau vitrifiés (granulés ou bouletés) Définitions, spécifications	Homologuée	07/91
NF P 98-107	Assises de chaussée Activation du laitier vitrifié Définitions, caractéristiques et spécifications	Homologuée	07/91
NF P 98-110	Assises de chaussée Cendres volantes silico-alumineuses Définitions, spécifications	Homologuée	11/91
NF P 98-112	Assises de chaussée Cendres volantes hydrauliques Définitions, spécifications	Homologuée	03/92

Numéro	Titre de la norme	État Déc. 1994	Date version
T 65-000	Liants hydrocarbonés Définitions, classification	Exp.	09/79
T 65-001	Liants hydrocarbonés Bitumes purs Spécifications	Exp.	12/92
T 65-002	Liants hydrocarbonés Bitumes fluidifiés Spécifications	Exp.	12/91
T 65-003	Liants hydrocarbonés Bitumes fluxés Spécifications	Exp.	12/91
T 65-004	Liants hydrocarbonés Bitumes composés Spécifications	Exp.	12/91
NFT T 65-011	Liants hydrocarbonés Emulsions de bitumes Spécifications	Homologuée	10/84
T 66-021	Liants hydrocarbonés Goudrons purs Spécifications	Exp.	12/91
T 66-022	Liants hydrocarbonés Goudrons modifiés Spécifications	Exp.	12/91

Numéro	Titre de la norme	État Déc. 1994	Date version
NORMES ESSAIS CHAUSSÉES			
NF P 98-200	Essais relatifs aux chaussées Mesure de la déflexion engendrée par une charge	Homologuée	1991
NF P 98-216-1	Essais relatifs aux chaussées Mesure de la macrotecture Détermination de la hauteur au sable vraie	Homologuée	04/92
NF P 98-216-2	Essais relatifs aux chaussées Détermination de la macrotecture Méthode de mesure sans contact des rugosités	Projet	
NF P 98-217-1	Essais relatifs aux chaussées Essais associés à la macrotecture Mesure de la drainabilité superficielle	Projet	
NF P 98-218-1	Essais relatifs aux chaussées Essais liés à l'uni longitudinal Essai à la règle fixe de 3 m	Homologuée	04/92
NF P 98-218-3	Essais relatifs aux chaussées Essais liés à l'uni longitudinal Index	Projet	
NF P 98-218-4	Essais relatifs aux chaussées Essais liés à l'uni longitudinal Profilamètres	Projet	
NF P 98-219-1	Essais relatifs aux chaussées Essais liés à l'uni transversal Données générales	Projet	
NF P 98-219-2	Essais relatifs aux chaussées Essais liés à l'uni transversal Mesure du profil en travers en continu	Projet	
NF P 98-219-3	Essais relatifs aux chaussées Essais liés à l'uni transversal Mesure du profil en travers échantillonné par capteurs sans contact	Projet	
NF P 98-220-2	Essais relatifs aux chaussées Essais liés à l'adhérence Mesure du coefficient de frottement longitudinal	Projet	

Numéro	Titre de la norme	État Déc. 1994	Date version
NF P 98-220-3	Essais relatifs aux chaussées Essais liés à l'adhérence Mesure du coefficient de frottement transversol	Projet	
S 31-119	Acaoustique Caractérisation <i>in situ</i> des qualités ocaustiques des revêtements de chaussées Mesuroge acoustique au passage	Exp.	10/93
NF P 98-230-1	Essais relatifs aux chaussées Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités Confection des éprouvettes par vibrocompression	Homologuée	04/92
NF P 98-231-1	Essais relatifs aux chaussées Matériaux traités aux liants hydrauliques Essai de compactage proctar modifié (additif pour les graves et sables)	Homologuée	11/92
NF P 98-231-4	Essais relatifs aux chaussées Comportement au compactage des matériaux autres que traités aux liants hydrocarbonés Mesure de l'indice de portance immédiate sur les sables traités aux liants hydrauliques	Homologuée	12/92
NF P 98-231-5	Essais relatifs aux chaussées Matériaux traités aux liants hydrauliques Détermination du délai de maniabilité	Projet	
NF P 98-232-2	Essais relatifs aux chaussées Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques Essai de traction directe sur sables et graves	Homologuée	09/92
NF P 98-232-3	Essais relatifs aux chaussées Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques Essai de compression diamétrale sur sables et sals fins	Homologuée	10/93
NF P 98-233-1	Essais relatifs aux chaussées Détermination du compartement en fatigue des matériaux traités aux liants hydrauliques Essai par flexion à amplitude de contrainte constante	Homologuée	04/94
NF P 98-234-2	Essais relatifs aux chaussées Comportement au gel des matériaux traités aux liants hydrauliques Essai de gonflement au gel	Projet	
NF P 98-235-1	Essais relatifs aux chaussées Matériaux de chaussée non traités Essai triaxial à chargements répétés	Projet	

Numéro	Titre de la norme	État Déc. 1994	Date version
NF P 98-251-1	Essais relatifs aux chaussées Essais statistiques sur mélanges hydrocarbonés Essai Duriez à chaud	Homologuée	06/91
NF P 98-252	Essais relatifs aux chaussées Détermination du comportement ou compactage des mélanges hydrocarbonés Essais de compactage à la presse à cisaillement girotoire	Homologuée	06/91
NF P 98-253-1	Essais relatifs aux chaussées Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés Essai d'ornièrage	Homologuée	06/91
NF P 98-254-2	Essais relatifs aux chaussées Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux Détermination du pourcentage de vides communicants des matériaux liés	Homologuée	04/93
NF P 98-254-3	Essais relatifs aux chaussées Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux Essai au drainomètre de chantier	Homologuée	03/93
NF P 98-259-1	Essais relatifs aux chaussées Comportement des mélanges hydrocarbonés par rapport à la fissuration Mesure du temps de remontée des fissures	Projet	
NF P 98-260-1	Essais relatifs aux chaussées Détermination des caractéristiques mécaniques des mélanges hydrocarbonés Détermination du module dynamique et de la perte de linéarité	Homologuée	07/92
NF P 98-260-2	Essais relatifs aux chaussées Détermination des caractéristiques rhéologiques des mélanges hydrocarbonés Détermination du module complexe par flexion sinusoïdale	Homologuée	09/92
NF P 98-261-1	Essais relatifs aux chaussées Détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés Essai de fatigue par flexion à amplitude de flèche constante	Homologuée	09/92
NF P 98-274-1	Essais relatifs aux chaussées Caractéristiques des enduits superficiels d'usure Essai d'adhésivité Vialit	Homologuée	10/94

Numéro	Titre de la norme	État Déc. 1994	Date version
AUTRES ESSAIS			
NF P 18-400	Bétans Modules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques	Homologuée	12/81
NF P 18-406	Bétans Essai de compression	Homologuée	12/81
NF P 18-408	Bétans Essai de fendage	Homologuée	12/81
P 18-560	Granulats Analyse granulométrique par tamisage	Exp.	12/90
P 18-561	Granulats Mesure du coefficient d'aplatissement	Exp.	12/90
P 18-572	Granulats Essai d'usure micro-Deval	Exp.	12/90
P 18-573	Granulats Essai Los Angeles	Exp.	12/90
P 18-575	Granulats Mesure du coefficient de polissage accéléré des gravillons	Exp.	12/90
P 18-578	Granulats Mesure de la rugosité d'une surface à l'aide du pendule de frottement	Exp.	09/90
P 18-591	Granulats Détermination de la propreté superficielle	Exp.	12/90
P 18-592	Granulats Essai au bleu de méthylène Méthode à la tache	Exp.	12/90
P 18-597	Granulats Détermination de la propreté des sables Essai d'équivalent de sable à 10 % de fines	Exp.	12/90
NF P 94-078	Sols Reconnaissance et essais Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat Indice portant immédiat Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR	Homologuée	12/92
NF P 94-093	Sols Reconnaissance et essai Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié	Homologuée	12/93

Page laissée blanche intentionnellement



ANNEXE 3 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES

- 1 • (1971), *Catologue de structures types de chaussées*, circulaire du 28 mai, DRCR, SETRA, LCPC.
- 2 • (1977), *Catologue des structures types de chaussées neuves*, circulaire 77-1156 du 5 décembre, DRCR, SETRA, LCPC.
- 3 • (1978), *Dimensionnement des renforcements des chaussées souples*, guide technique, SETRA-LCPC, juin.
- 4 • (1981), *Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic*, SETRA-LCPC, juillet.
- 5 • (1988), *Actualisation du catalogue des structures types de chaussées neuves et guide de dimensionnement des renforcements de chaussées souples*, SETRA-LCPC, avril.
- 6 • (1994), *Manuel de conception des chaussées d'outoroutes*, Scétouroute.

CONCEPTION DES PROJETS ROUTIERS

- 7 • (1985), *Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des outoroutes de liaison (ICTAAL)*, SETRA.
- 8 • (1988), *Établissement des coupes transversales de chaussées*, SETRA-CETE de l'Ouest, avril.
- 9 • (1990), *Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des voies rapides urbaines*, CERTU.
- 10 • (1994), *Instruction et guide technique pour l'aménagement des routes principales*, SETRA.
- 11 • (1982), *Recommandation pour l'assainissement routier*, SETRA-LCPC.

ÉLÉMENTS ÉCONOMIQUES

- 12 • (1981), *Stratégies de dimensionnement et d'entretien, aspects économiques et énergétiques, rapport du thème 6*, Rev. Gén. routes et aérodromes, 577, juillet-oct., pp. 132-145.

- 13 • (1985), *Rapport sur la politique des renforcements coordonnés des routes nationales, mission interministérielle de rationalisation des choix budgétaires, Rev. Gén. routes et aéroports*, **615**, janvier.
- 14 • (1989), *Mise en concurrence des techniques de construction et de renforcement des chaussées*, ministère de l'Équipement, circulaire, **89-46**, 8 août.

PROPRIÉTÉS D'USAGE DES CHAUSSÉES ET POLITIQUE D'ENTRETIEN

- 15 • (1979), *Entretien préventif du réseau routier national*, guide technique, SETRA-LCPC, modification 1984.
- 16 • (1988), *Adhérence des chaussées neuves*, ministère de l'Équipement, circulaire, **88-78**, 1^{er} septembre.
- 17 • (1989), *Système de quantification du niveau de service à l'entretien et à l'exploitation*, guide méthodologique, SETRA-CETE de l'Ouest.

TERRASSEMENTS

- 18 • (1982), *Reconnaissance géologique et géotechnique des tracés des routes et autoroutes*, note d'information technique, LCPC.
- 19 • (1992), *Réalisation des remblais et des couches de forme*, guide technique, SETRA-LCPC, septembre.
- 20 • (à paraître 1995), *Traitement des sols à la chaux, aux liants hydrauliques et pouzzolaniques*, guide technique, LCPC-SETRA.

TECHNIQUES DE CHAUSSÉE

- 21 • (1972), *Réalisation des assises de chaussée en grave-bitume et sable-bitume*, directive, SETRA-LCPC, septembre.
- 22 • (1974), *Réalisation des assises de chaussée en graves-émulsion*, directive, SETRA-LCPC, décembre.
- 23 • (1978), *Réalisation des chaussées en béton de ciment*, directive, SETRA-LCPC, mai.
- 24 • (1978), *Recommandation pour la réalisation des couches de surface de chaussée en béton bitumineux clauté*, SETRA-LCPC, octobre.
- 25 • (1979), *Technique française des assises de chaussée traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques*, dossier, LCPC-SETRA.
- 26 • (1980), *Réalisation des assises de chaussée en grave non traitée*, complément à la recommandation, LCPC-SETRA, décembre.

- 27 • (1982), *Compactage des ossises de chaussée traitées aux liants hydrauliques ou non traitées*, guide technique, SETRA-LCPC, décembre.
- 28 • (1983), *Réalisation des assises de chaussée en graves traitées aux liants hydrauliques*, directive, SETRA-LCPC.
- 29 • (1985), *Réalisation des assises de chaussée en sables traités aux liants hydrauliques*, directive, SETRA-LCPC, février.
- 30 • (1985), *Réalisation des chaussées en béton compacté*, recommandation, SETRA-LCPC, novembre.
- 31 • (1991), *Les avis techniques dans le domaine routier*, note d'information, **69**, SETRA, août.
- 32 • (1994), *Enrobés hydrocarbonés à chaud*, guide d'application des normes pour le réseau routier national non concédé, SETRA-LCPC.

AUTRES PUBLICATIONS

- 33 • LÉGER P. (1964), *Recommandations pour le dimensionnement des chaussées d'outoroutes et des chaussées à trafic lourd*, *Bull. liaison*, Lab. P. et Ch., suppl. ou n° spécial **B**, janvier.
- 34 • ROUQUES G. (1978), *Commentaires du catalogue des structures-types des chaussées neuves*, *Rev. Gén. routes et aéroports*, suppl. au **541**, avril, pp. 1-22.
- 35 • AUTRET P., DE BOISSOUY A., MARCHAND J.-P. (1982), *Pratique d'ALIZE III*, rapport des laboratoires, série Construction routière, CR-2, LCPC, pp. 3-62.
- 36 • PEYRONNE C., CAROFF G. (1984), *Dimensionnement des chaussées*, *cours de routes*, presses de l'ENPC, Paris.
- 37 • *Code de la route*, 1, parties législative et réglementaire.

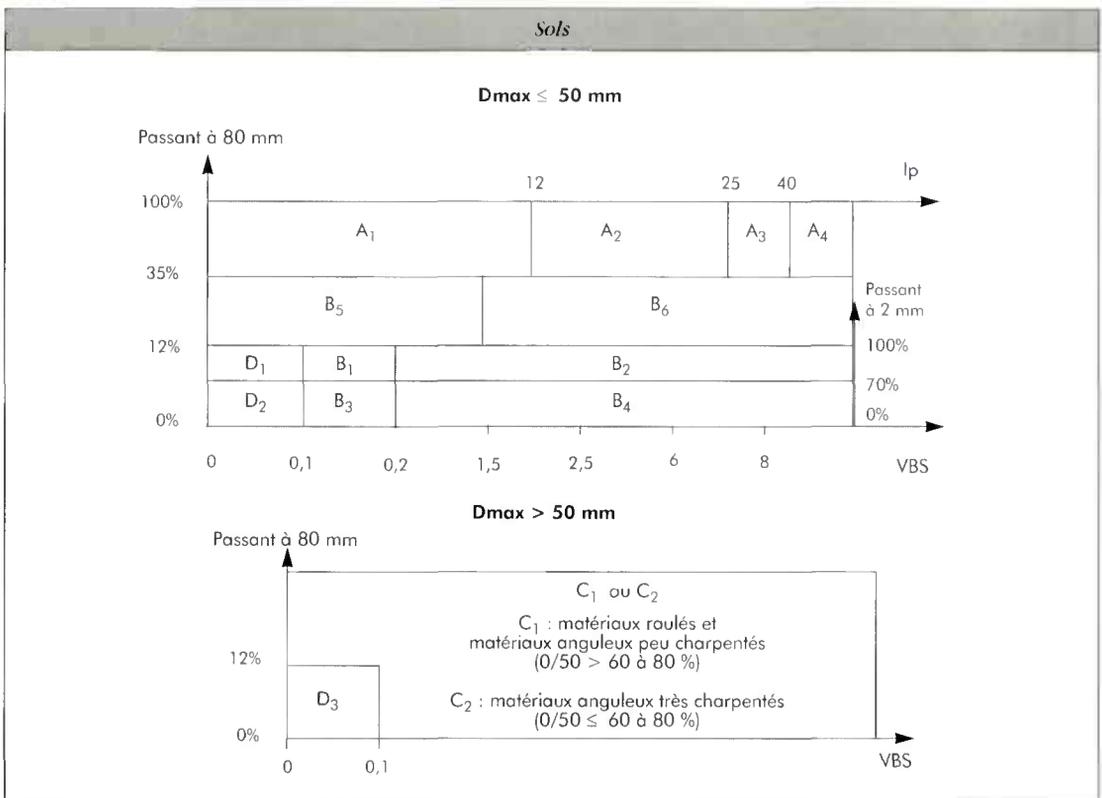
LOGICIELS

- 38 • ALIZÉ, logiciel de calcul des déflexions de surface, des contraintes et des déformations des structures de chaussée, LCPC, Paris.
- 39 • ÉCOROUTE 4, logiciel pour le dimensionnement des chaussées, presses de l'ENPC, Paris.
- 40 • GEL 1D, logiciel de modélisation monodimensionnel de la congélation de structures de chaussées multicouches, LCPC, Paris.

Page laissée blanche intentionnellement



ANNEXE 4 TABLEAUX SYNOPTIQUES DE CLASSIFICATION DES SOLS ET DES MATÉRIAUX ROCHEUX



<i>Matériaux rocheux</i>			
Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R ₁
		Calcaires	R ₂
	Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	
	Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	
	Roches salines	Sel gemme, gypse...	
Roches magmatiques et métamorphiques	Gronites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R ₆

<i>Matériaux particuliers</i>	
Sols organiques et sous-produits industriels	F

Page laissée blanche intentionnellement



ANNEXE 5 CALCUL DE L'AGRESSIVITÉ D'UN TRAFIC

Cette annexe décrit le mode de calcul de l'agressivité d'un trafic connaissant la répartition des poids lourds et des essieux qui le composent.

Les histogrammes de charge par type d'essieu se déterminent à l'aide de stations de pesage composées de systèmes de câbles piézo-électriques associés à des boucles électro-magnétiques permettant de peser en marche les essieux tout en reconnaissant leur type.

AGRESSIVITÉ D'UN ESSIEU

L'agressivité, A , est estimée vis-à-vis de l'endommagement par fatigue de la chaussée. Elle correspond au dommage provoqué par un passage d'un essieu de charge P , par rapport au dommage dû à un passage de l'essieu isolé de référence de charge P_0 . L'agressivité est calculée par la formule :

$$A = K \left(\frac{P}{P_0} \right)^\alpha$$

K est un coefficient permettant de tenir compte du type d'essieu (simple isolé, tandem, tridem). Un essieu est considéré comme isolé lorsque sa distance par rapport à l'essieu voisin le plus proche est supérieure à 2 m.

K et α dépendent de la nature du matériau et de la structure de chaussée. Des valeurs moyennes sont indiquées dans le tableau A.5.1.

Tableau A.5.1.
Valeurs des paramètres K et α pour le calcul d'agressivité d'un essieu (sur structures neuves moyen et fort trafic)

	α	K		
		Essieu simple	Essieu tandem	Essieu tridem
Structures souples et bitumineuses	5	1	0,75	1,1
Structures semi-rigides	12	1	12	113
Structures en béton :				
• dalles	12	1	12	113
• béton armé continu	12	1	?	?

AGRESSIVITÉ D'UN POIDS LOURD

L'agressivité d'un poids lourd est égale à la somme des agressivités de ses essieux.

AGRESSIVITÉ D'UN TRAFIC

Connaissant l'histogramme de charges par type d'essieu pour un trafic donné, l'agressivité de ce trafic est qualifiée par le coefficient CAM, correspondant à l'agressivité moyenne du poids lourd composant ce trafic par rapport à l'essieu pris pour référence :

$$CAM = \frac{1}{NPL} \left[\sum_i \sum_{j=1}^3 K_j n_{ij} \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^\alpha \right]$$

NPL nombre de poids lourds pendant la période de comptage,

K_j coefficient correspondant au type d'essieu

($j = 1$ essieu simple,

2 essieu tandem,

3 essieu tridem.)

n_{ij} nombre d'essieux élémentaires de type j et de classe de charge P_i .

Un exemple de calcul détaillé est donné ci-après.

EXEMPLE DE CALCUL DÉTAILLÉ DE L'AGRESSIVITÉ D'UN TRAFIC

Pendant cinq jours de comptage, une station de pesage a dénombré le passage de 805 poids lourds représentant :

– 1 854 essieux simples,

– 436 essieux élémentaires en tandem,

– 168 essieux élémentaires en tridem,

avec une répartition des charges donnée dans le tableau A.5.2.

Pour une structure de chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques :

– $\alpha = 12$,

– $K_1 = 1$ (essieu simple),

– $K_2 = 12$ (tandem),

– $K_3 = 113$ (tridem).

D'après le tableau A.5.2., l'effet de ce trafic est équivalent à celui de $(535 + 102 + 11 =) 648$ essieux de référence de 130 kN, ce qui correspond à un coefficient d'agressivité moyen CAM pour ce trafic (en rapportant ce nombre à celui du nombre de poids lourds comptabilisés) :

$$CAM = \frac{648}{805} = 0,8$$

Tableau A.5.2. – Tableau pour le calcul de l'agressivité d'un trafic

Classes de charge (kN)	Centre Classe (kN)	Essieux élémentaires simples			Essieux élémentaires tandem			Essieux élémentaires tridem		
		Agressivité	Nb. essieux	A x N1	Agressivité	Nb. essieux	A x N2	Agressivité	Nb. essieux	A x N3
		Centre classe A	N1		Centre classe A	N2		Centre classe A	N3	
10-30	20	1,8 E-10	210	3,78 E-8	2 E-9	107	2 E-7	2 E-8	48	9 E-9
30-40	35	1,45 E-7	160	2,32 E-5	1,5 E-6	78	0,0001	1,5 E-5	34	0,0005
40-50	45	3 E-6	100	0,0003	4,2 E-5	66	0,0027	3,1 E-4	28	0,009
50-60	55	3,3 E-5	290	0,001	3,6 E-4	60	0,02	3,4 E-3	22	0,07
60-70	65	0,00025	280	0,07	0,003	50	0,15	0,028	16	0,45
70-80	75	0,0014	216	0,3	0,02	28	0,56	0,16	14	0,45
80-90	85	0,006	210	1,26	0,08	24	1,92	0,68	4	2,72
90-100	95	0,023	180	4,14	0,3	8	1,8	2,6	2	5,2
100-110	105	0,08	68	5,44	1	6	6	9	0	0
110-120	115	0,23	50	11,5	2,76	5	13,8			
120-130	125	0,62	40	24,8	7,4	2	14,8			
130-140	135	1,57	25	39,25	18,8	1	18,8			
140-150	145	3,7	9	33,3	18,8	1	44,4			
150-160	155	8,25	7	57,75	99	0	0			
160-170	165	17,5	5	87,39						
170-180	175	35,4	2	70,82						
180-190	185	69	1	68,98						
190-200	195	130	1	129,75						
200-210	205	236	0	0						
TOTAL			N1=1 854	535		N2= 436	102		N3= 168	11

Page laissée blanche intentionnellement



ANNEXE 6 CALCUL DE LA TEMPÉRATURE ÉQUIVALENTE POUR UNE CHAUSSÉE BITUMINEUSE

PRINCIPE

Le comportement en déformation et à la fatigue des matériaux bitumineux variant avec la température, les niveaux de sollicitation et d'endommagement de la chaussée fluctuent en cours d'année avec les cycles de température.

Le calcul de dimensionnement est fait pour une température constante dite **température équivalente** θ_{eq} . Celle-ci est telle que la somme des dommages subis par la chaussée pendant une année, pour une distribution de températures donnée, soit égale au dommage que subirait la chaussée soumise au même trafic mais pour une température constante θ_{eq} .

La température équivalente se détermine par application de la règle de Miner.

Pour une température θ_i , soit :

- $\varepsilon(\theta_i)$ la déformation en traction dans la chaussée sous l'essieu standard de dimensionnement,
- $N_i(\theta_i)$ le nombre de chargements provoquant la rupture en fatigue pour le niveau de déformation $\varepsilon(\theta_i)$,
- $n_i(\theta_i)$ le nombre de passages d'essieu équivalents subis par la chaussée, à la température θ_i .

Par définition de la notion de température équivalente :

$$\sum_i \frac{n_i(\theta_i)}{N_i(\theta_i)} = \frac{\sum_i n_i(\theta_i)}{N(\theta_{eq})}$$

Ou encore en intraduisant l'expression de la loi de fatigue :

$$\frac{1}{N(\theta_{eq})} = \frac{1}{\sum_i n_i(\theta_i)} \left[\sum_i n_i(\theta_i) \left\{ \frac{\varepsilon_0(\theta_i)}{\varepsilon(\theta_i)} \right\}^{1/b} \times 10^{-6} \right]$$

Ayant ainsi calculé le dommage élémentaire $1/N(\theta_{eq})$, θ_{eq} s'obtient d'après la courbe donnant la variation du dommage avec la température comme cela est illustré dans l'exemple qui suit.

EXEMPLE

Considérons une structure bitumineuse constituée de deux couches de grave-bitume de 14 cm chacune et d'une couche de surface en béton bitumineux de 8 cm d'épaisseur, reposant sur une plate-forme PF2 (E = 50 MPa).

Le trafic est supposé uniformément réparti sur l'année.

Des essais de laboratoire ont permis de déterminer l'évolution du module complexe du béton bitumineux et de la grave-bitume avec la température, pour une fréquence de 10 Hz (fig. A.6.1. et A.6.2.).

Figure A.6.1 – Evolution du module complexe du béton bitumineux en fonction de la température

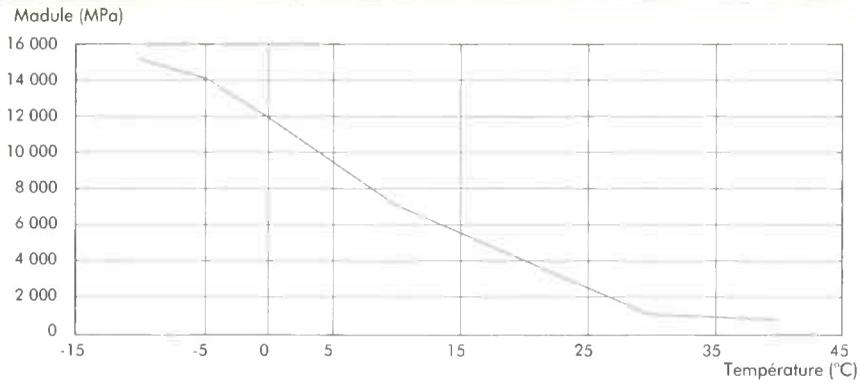
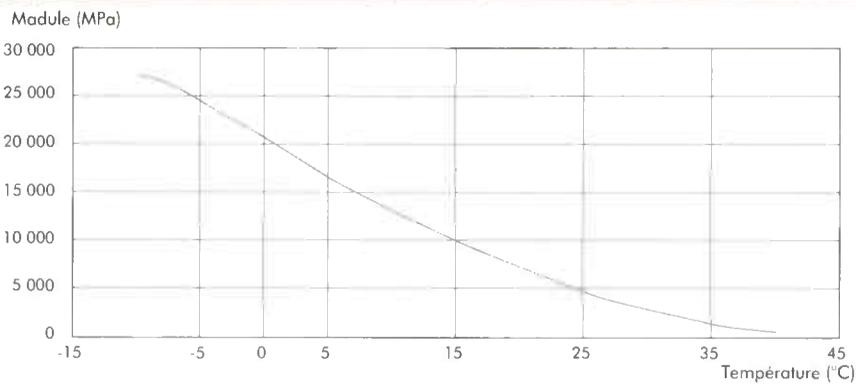


Figure A.6.2. – Evolution du module complexe de la grave-bitume en fonction de la température

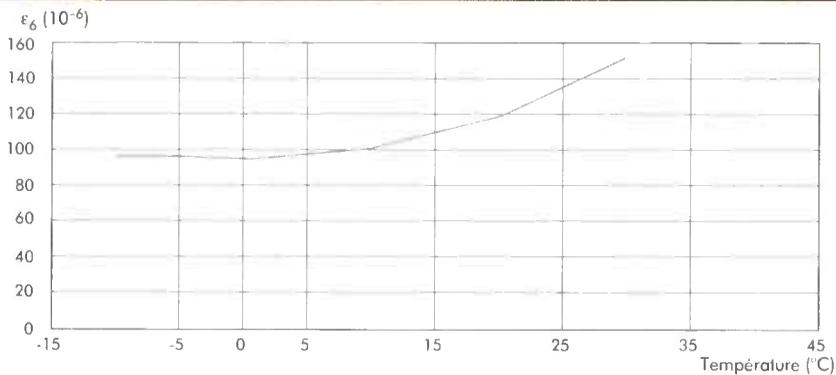


Les essais de fatigue sur la grave-bitume à 10 °C donnent:

- une pente $b = -0,23$
- $\epsilon_6 = 92 \cdot 10^{-6}$

L'évolution de ϵ_6 avec la température est présentée par la figure A.6.3.

Figure A.6.3. – Déformation ϵ_6 de la grave-bitume en fonction de la température



Dans le cas présent, la distribution annuelle des températures à 15 cm de profondeur, exprimée en pourcentage par plage de 5 °C, est donnée par le tableau A.6.1. Pour cet exemple, par mesure de simplification des calculs, on fera l'hypothèse que la température est uniforme sur toute l'épaisseur de la chaussée.

Tableau A.6.1. – Distribution annuelle des températures à 15 cm de profondeur

θ (°C)	-5	0	5	10	15	20	25	30
durée (%)	10	12	18	14	18	18	8	2

Partant de ces données, la température équivalente se déduit comme suit :

- on relève les modules des couches bitumineuses correspondant à chacune des températures θ_i ,
- on calcule la déformation $\epsilon(\theta_i)$ à la base de l'assise en grave-bitume,
- connaissant $\epsilon_\delta(\theta_i)$, on en déduit le dommage élémentaire

$$\left\{ \frac{\epsilon_\delta(\theta_i)}{\epsilon(\theta_i)} \right\}^{1/b} \times 10^{-6}$$

- à partir de la distribution du trafic sur l'année, on calcule $1 / N(\theta_{eq})$,
- à l'aide de la courbe de dommage, on détermine θ_{eq} .

Modules des matériaux bitumineux

Le tableau A.6.2. regroupe les valeurs de module correspondant aux figures A.6.1. et 2.

Tableau A.6.2. – Modules (en MPa) du béton bitumineux et de la grave-bitume (à 10 Hz)

θ(°C)	-5	0	5	10	15	20	25	30
E _{BB}	14 000	12 000	9 800	7 200	5 300	3 600	2 100	1 300
E _{GB}	24 500	20 900	17 200	13 500	10 200	7 100	4 600	2 700

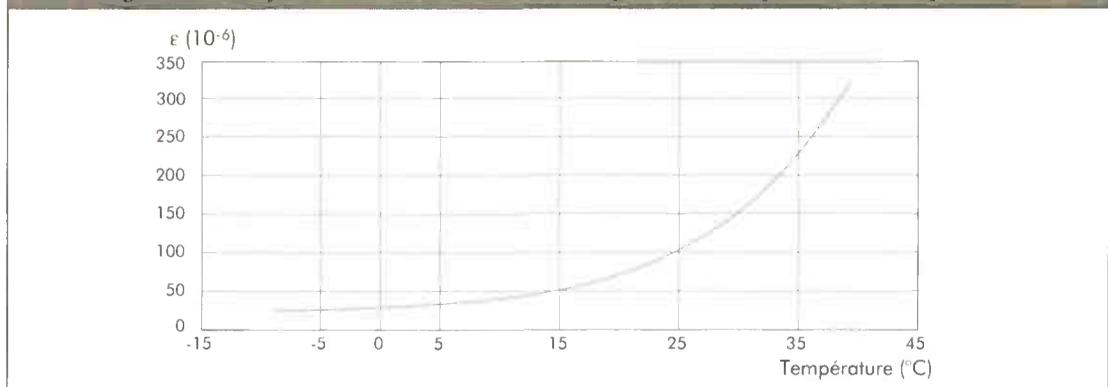
Valeurs de déformation à la base de la grave-bitume

Les déformations en traction à la base de la grave-bitume, pour les valeurs de module précédentes et en retenant une valeur de coefficient de Poisson constante égale à 0,35, sont portées dans le tableau A.6.3. et représentées graphiquement par la figure A.6.4.

Tableau A.6.3. – Déformation à la base de la grave-bitume

θ (°C)	-5	0	5	10	15	20	25	30
$\epsilon_1 (10^{-6})$	24	27	32	40	51	68	98	149

Figure A.6.4. – Déformation en traction à la base de la grave-bitume en fonction de la température

**Dommage élémentaire à la température θ_i**

Le dommage élémentaire s'exprime sous la forme :

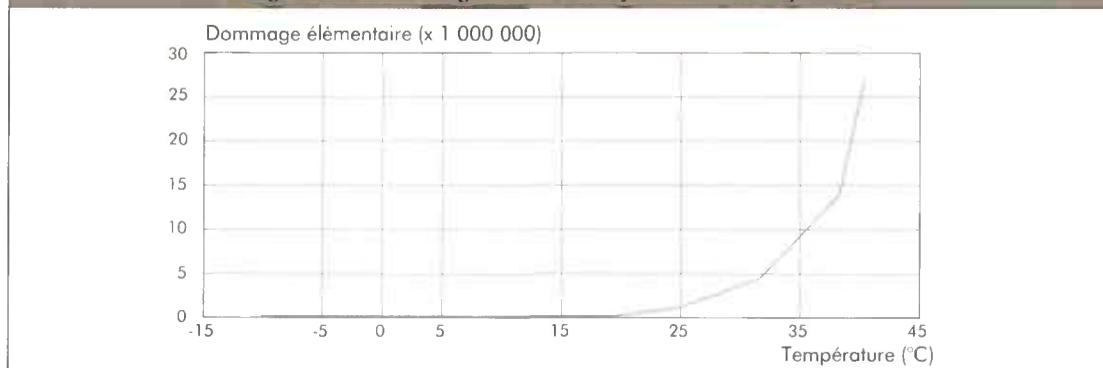
$$d(\theta_i) = \left\{ \frac{\varepsilon_\delta(\theta_i)}{\varepsilon(\theta_i)} \right\}^{1/b} \times 10^{-6}$$

il se calcule à partir des valeurs de $\varepsilon_\delta(\theta_i)$ d'après la figure A.6.3. et de $\varepsilon(\theta_i)$ calculées à l'étape précédente. Les résultats sont présentés par le tableau A.6.4. et la figure A.6.5.

Tableau A.6.4. – Valeurs de dommage élémentaire ($\times 10^6$) en fonction de la température

θ (°C)	-5	0	5	10	15	20	25	30
$\varepsilon_\delta(\theta_i)$	95	95	94	92	96	100	110	121
$d(\theta_i)$ ($\times 10^6$)	~0,00	~0,00	0,01	0,03	0,06	0,19	0,62	2,47

Figure A.6.5. – Dommage élémentaire en fonction de la température



Dommage élémentaire pour la température équivalente

Celui-ci s'exprime par la relation :

$$\frac{1}{N(\theta_{eq})} = \sum_i \left[\frac{n_i(\theta_i)}{\sum_i n_i(\theta_i)} d(\theta_i) \right]$$

Comme le trafic est supposé uniformément réparti sur l'année, les valeurs de

$$n_i(\theta_i) / \sum_i n_i(\theta_i)$$

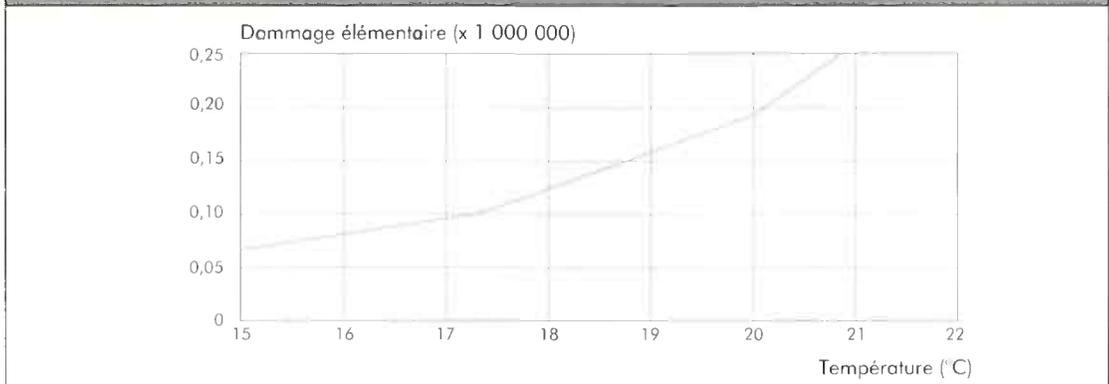
correspondent aux pourcentages donnés par tranche de températures par le tableau A.6.1.

En combinant ces valeurs avec celles du tableau A.6.5. on obtient :

$$\frac{1}{N(\theta_{eq})} = 0,15$$

D'après la courbe d'évolution du dommage en fonction de la température (fig. A.6.6.) la température équivalente θ_{eq} est donc d'environ 18,7 °C.

Figure A.6.6. – Dommage élémentaire en fonction de la température : détail de la figure A.5.5.



Page laissée blanche intentionnellement



ANNEXE 7 CALCUL D'UNE STRUCTURE DE CHAUSSÉE INTÉGRANT LA COUCHE DE FORME TRAITÉE

PRINCIPE

Dans les cas usuels, l'épaisseur de la couche de forme est déterminée à partir des tableaux donnés dans la partie IV. Pour la justification de la structure de chaussée, l'ensemble sol support et couche de forme est dans ce cas assimilé à un massif homogène semi-infini.

Dans certains cas, il peut être économiquement intéressant de chercher à adapter l'épaisseur de la couche de forme et celle de la chaussée en fonction des caractéristiques mécaniques que l'on peut obtenir avec des matériaux traités aux liants hydrauliques en couche de forme. La justification du dimensionnement est faite ici en considérant la couche de forme à l'instar d'une couche de chaussée.

DÉFINITION DU CAS D'ÉTUDE

La chaussée est à concevoir pour une durée initiale de 20 ans avec un trafic T_0 à la mise en service et un taux de progression géométrique de 7% par an.

La partie supérieure des terrassements est de type PST n 2 (bonne portance à court terme permettant la mise en œuvre des couches de chaussée, mais la portance à long terme est de classe AR1). Les sals constituant le support sont des sables limono-argileux de classe B5 pouvant être traités en place par un traitement mixte chaux plus ciment pour être employés en couche de forme.

La structure de chaussée envisagée est une chaussée semi-rigide en grave-laitier granulé.

Deux cas sont considérés ici, la construction de la chaussée sans couche de forme traitée (plate-forme de type PF1) et celui où l'on traite le sol en place pour améliorer la portance de la plate-forme support de chaussée.

• Dimensionnement de la chaussée sur une plate-forme PF1

Données

Trafic

Trafic cumulé par voie $N = 17,96 \cdot 10^6$

Nombre d'essieux équivalents :

sol CAM = 1 NE = $17,96 \cdot 10^6$

grave-laitier CAM = 1,3 NE = 23,34 10⁶

Couche de surface

Avec un trafic T0, compte tenu des granulats entrant ici dans la composition de la grave-laitier, pour protéger l'assise, la couche de surface retenue est un béton bitumineux de 14 cm d'épaisseur.

Caractéristiques mécaniques des matériaux

La température équivalente retenue pour l'exemple est de 15 °C.

	E (MPa)	v	σ_6 ou ε_6	b	SN
Grave-laitier granulé	15 000	0,25	0,60 (MPa)	-1/12,5	1
BB	5 400	0,35	100 10 ⁻⁶	-0,2	0,25

Conditions de réalisation

- *Interfaces*

Il y a continuité à toutes les interfaces (couches collées).

- *Dispersion sur les épaisseurs des couches de grave-laitier*

$$Sh_{GL} = 3 \text{ cm}$$

- *Dimensionnement de la chaussée sur une plate-forme PF1*

Valeurs limites admissibles

Sol. Déformation verticale $\varepsilon_{z,ad}$

$$\varepsilon_{z,ad} = 0,012 (NE)^{-0,222}$$

$$\varepsilon_{z,ad} = 294 \cdot 10^{-6}$$

Grave-laitier. Contrainte horizontale $\sigma_{t,ad}$

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_1 (NE) k_r k_c k_s$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 (NE) &= \sigma_6 (NE/10^6)^b \\ &= 0,60 (23,34)^{-1/12,5} \\ &= 0,46 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- $k_r = 10^{-ub\delta}$

risque r = 2,5 %

$$u = -1,960$$

$$b = -1/12,5$$

$$c = 0,02 \text{ cm}^{-1}$$

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0,5} = 1,25$$

$$k_r = 10^{-0,196} = 0,637$$

- $k_c = 1,5$
- $k_s = 1/1,2$

► $\sigma_{t,ad} = 0,37 \text{ MPa}$

Dimensionnement

C'est le critère de traction à la base de la couche de fondation en grave-laitier qui est déterminant. La condition $\sigma_t < \sigma_{t,ad} = 0,37 \text{ MPa}$ est satisfaite avec une épaisseur totale de grave-laitier de 46 cm.

La structure serait ainsi constituée : 7 cm de BB en couche de surface, 7 cm de BB de liaison, 46 cm de grave-laitier mis en oeuvre en deux couches (24 + 22).

• **Dimensionnement de la chaussée avec une couche de forme traitée**

L'étude de laboratoire a montré que l'on pouvait obtenir par traitement mixte chaux et ciment avec le sol en place les caractéristiques suivantes à 90 jours :

$$E_{t90} = 10\,000 \text{ MPa}$$

$$R_{t90} = 0,40 \text{ MPa}$$

ce qui d'après la figure IV.5. et le tableau IV.5. de la partie IV correspond à un matériau de classe mécanique 4.

Caractéristiques mécaniques du sol traité pour le calcul de dimensionnement

Celles-ci se déduisent par application des relations suivantes tirées de la partie V :

$$E_{90} / E_{360} = R_{t90} / R_{t360} = 0,90$$

$$\sigma_6 / R_{t360} = 0,90$$

$$\sigma_6 = 0,75 (\sigma_6 / R_{t360}) R_{t360}$$

$$E = 0,75 E_{360}$$

► $\sigma_6 = 0,30 \text{ MPa}$

► $E = 8\,300 \text{ MPa}$

Conditions de réalisation

Les interfaces :

- couche de surface bitumineuse/cauche de base en grave-laitier,
 - couche de base/cauche de fondation en grave-laitier granulé,
 - couche de forme/sol support,
- sont considérées comme callées.

En revanche l'interface couche de fondation/cauche de forme traitée est considérée glissante.

Valeurs limites admissibles

Sol support non traité. Déformation verticale $\varepsilon_{z,ad}$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{z,ad} &= 0,012 (NE)^{-0,222} \\ \varepsilon_{z,ad} &= 294 \cdot 10^{-6}\end{aligned}$$

Cauche de forme traitée. Contrainte horizontale $\sigma_{i,ad}$

$$\sigma_{i,ad,ad} = \sigma_t (NE)$$

avec $b = -1/10$

►

$$\begin{aligned}\sigma_{i,ad} (NE) &= \sigma_0 (NE/10^6)^b \\ &= 0,30 (23,34)^{-1/10} \\ &= 0,22 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Grave-laitier. Contrainte horizontale $\sigma_{i,ad}$

$$\sigma_{i,ad} = \sigma_t (NE) k_r k_c k_s$$

Par rapport au cas précédent, du fait de la présence de la couche de forme en matériau traité cette fois on retiendra pour k_s la valeur 1.

►

$$\sigma_{i,ad} = 0,44 \text{ MPa}$$

Calcul des contraintes et déformations

Les valeurs de la contrainte de traction à la base des couches de fondation et de forme obtenues par le calcul pour différentes épaisseurs sont données dans le tableau A.7.1.

	14 BB/40 GLg/20 CdF	14 BB/38 GLg/ 20 CdF	14 BB/38 GLg/25 CdF
Fondation σ_t (MPa)	0,43	0,46	0,44
Cauche de forme σ_t (MPa)	0,11	0,12	0,14

On remarque que le critère de fatigue sur la couche de forme n'est pas déterminant. Les solutions 14 BB/40 GLg/20 CdF et 14 BB/38 GLg/25 CdF sont acceptables du point de vue du calcul. Pour tenir compte des irrégularités inévitables lors du traitement en place, la valeur de l'épaisseur de couche de forme tirée du calcul doit être majorée de 5 cm comme indiqué en IV.5.2.3.

Pour assurer une mise en œuvre convenable de la couche de forme et de la couche de fondation, il est recommandé de retenir une épaisseur minimale de 30 cm avec une arase de classe AR1. On retiendra donc ici la solution 14 cm de BB en couche de surface, 38 cm de grave-laitier mis en œuvre en deux couches et 30 cm de couche de forme traitée.

Document publié par le LCPC
sous le numéro 502 701

Conception et réalisation
LCPC IST-Publications, Cécile Desthuilliers

Graphisme
Laure Ajaur

Dessins
LCPC IST-Publications, Philippe Caquelard

Crédits photographiques
LRPC d'Angers, de Bardeaux, de Clermont-Ferrand, de Lille, de Saint-Brieuc
CECP d'Angers
LCPC, SETRA

Exécution et flossage
Groupe Poly Print

Impression
Imprimerie Julien-Nallet

Dépôt légal
4^e trimestre 1994

ISBN 2-7208-7010-2

Laboratoire Central des Pants et Chaussées
58, boulevard Lefebvre – F-75732 Paris cedex 15
téléphone 33 (1) 40 43 50 00
télécapie 33 (1) 40 43 54 98
telex LCPARIS 200361F

Page laissée blanche intentionnellement



AIDE-MÉMOIRE

Annexe au guide technique Conception et dimensionnement des structures de chaussée

Avertissement : cet aide-mémoire résume l'essentiel des valeurs numériques nécessaires au dimensionnement des structures de chaussées routières. Mais, seul, il ne suffit pas à expliciter la démarche de dimensionnement ; il faut pour cela se reporter au guide technique.

SOMMAIRE

MODÉLISATION

Notations principales.....	1
Charge de référence	2
Structure	2
Couche de surface bitumineuse	2
Conditions d'interface	3
Plate-forme, sol et couche granulaire	4
Modules des matériaux traités.....	6

VERIFICATION

Trafic.....	7
Sollicitations admissibles.....	8
Caractéristiques en fatigue	9
Valeurs de risque r (%)	10
Valeurs de u associées au risque r	10
Relations diverses.....	10
Prise en compte du gel/dégel	11

Décembre 1994



LCPC

NOTATIONS PRINCIPALES

BC béton de ciment
 GNT grave non traitée
 GRH grave reconstituée humidifiée
 MB matériaux bitumineux
 MTLH matériaux traités aux liants hydrauliques

CBase couche de base
 CFond couche de fondation
 CForme couche de forme
 CLiaison couche de liaison
 CRoulement couche de roulement

$\epsilon_6(10^\circ\text{C}; 25 \text{ Hz})$ déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion de l'éprouvette est obtenue au bout de 10^6 cycles avec une probabilité de 50%, à 10°C et 25 Hz

θ_{eq} température équivalente adoptée pour le calcul ; 15°C en France métropolitaine

ν coefficient de Poisson

σ_6 contrainte pour laquelle la rupture par traction en flexion sur éprouvette de 360 jours est obtenue pour 10^6 cycles

τ taux de croissance géométrique annuel du trafic

ARI orose de ferrosissement de classe i

b pente de la droite de fatigue

c 2m^{-1} ou $0,02 \text{ cm}^{-1}$

CAM coefficient d'agressivité moyenne du trafic

e épaisseur de couche de sol dégelée

$E(\theta)$ module d'un matériau bitumineux à la température θ

f_f résistance en flexion

f_t résistance en traction par fendage

GTR Guide technique Réalisation des remblais et des couches de forme

h_i épaisseur de la couche n^i

IA indice de gel admissible

IR indice de gel de l'hiver de référence

IS indice de gel de surface

II indice de gel transmis à la base de la structure

MJA moyenne journalière annuelle

NE nombre d'essieux équivalents

p période de calcul (en années) ou pente de l'essai de gonflement

PFi plate-forme de classe i

Q_g quantité de gel admissible par les matériaux gélifs du support

Q_M quantité de gel fonction de la résistance mécanique de la structure en phase de dégel

Q_{ng} protection thermique assurée par les matériaux non gélifs

r risque de rupture adopté pour le calcul

SGn sol non gélif

SGp sol peu gélif

SGt sol très gélif

Sh dispersion sur l'épaisseur de la couche à la mise en œuvre

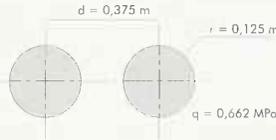
SN dispersion sur le logarithme du nombre de cycles à rupture à l'essai de fatigue

t trafic poids lourds exprimé en MJA/i/sens à l'année de la mise en service

u variable aléatoire associée au risque r

CHARGE DE RÉFÉRENCE

Demi-essieu à roues jumelées de 65 kN.



STRUCTURE

Système multi-couche élastique linéaire, isotrope et homogène.

Caractéristiques des matériaux : E et ν .

Couche d'épaisseur h, infinie en plan (pos de bords ou fissures).

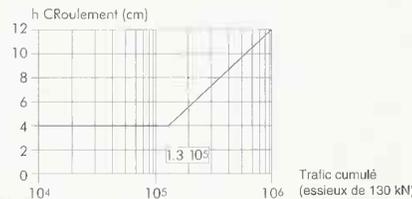
Sol d'épaisseur infinie. Interface : collée ou glissante.

Exemple :	Couche 1	h_1	E1	ν_1	Collée
	Couche 2	h_2	E2	ν_2	Glissante
	Couche 3	∞	E3	ν_3	

COUCHE DE SURFACE BITUMINEUSE

Fonction de la structure et du trafic.

1. CHAUSSEE À FAIBLE TRAFIC



2. CHAUSSEE A FORT TRAFIC

2.1. Chaussée semi-rigide

$T \leq T_2$: 6 cm
$T = T_1$: 8 cm
$T \geq T_0$: 10 à 14 cm

2.2. Autres cas

Fonction des limites technologiques et de l'épaisseur totale de la structure

Remarque : couche de liaison en BBME ou BBSG souhaitable si :

- fort trafic ou $h_{CRoulement} \leq 5 \text{ cm}$
- exigence de niveau d'uni élevée

$h_{CLiaison}$: 5 à 7 cm

CONDITIONS D'INTERFACE

C : collée

S : semi-collée

G : glissante

(semi-collée : artifice de modélisation consistant à faire un premier calcul avec l'interface collée, un second avec la même interface glissante et à faire la demi-somme des grandeurs calculées à chaque niveau ; ce sont ces valeurs moyennes que l'on retient pour le dimensionnement)

	C	S	G
Matériaux hydrocarbonés/support		X	
CFond/Plate-forme		X	
Cas particulier : étude globale chaussée/CForme			
CFond / CForme traitée			X
Structure bitumineuse			
Toutes couches		X	
Structure semi-rigide			
CRoulement/CBase		X	
CBase/CFond :			
GCV/GCV			X
GCH/GCH			X
GC/GC			X
GLg/GLg	X		
GLp/GLp			X
GLR/GLR			X
Sables traités			X
CFond/support	(1)		
Structure béton			
CRoulement (éventuelle) /CBase		X	
CBase/CFond			X
CFond/support	(1)		
Structure inverse			
Toutes couches		X	
Structure mixte			
Première phase de calcul : toutes couches		X	
Seconde phase de calcul : CBase/CFond			X
Autres couches		X	

1. collée sauf si :

- couche de forme traitée + couche de cure : CFond/CForme glissante ou
 - étude globale chaussée /CForme :
- CFond/CForme et CForme /sol support glissantes

PLATE-FORME, SOL ET COUCHE GRANULAIRE

1. PLATE-FORME : MASSIF HOMOGÈNE

Le module de calcul est celui de la limite inférieure de la classe :

Classes	PF1	PF2	PF3	PF4
Limites (MPa)	20	50	120	200

$\nu = 0,35$

Règles de sur-classement de portance de la plate-forme : (issues du GTR)

1.1. Surclassement de PFi avec CForme non traitée

ARi	Matériaux de CForme	h CForme	PFi
AR1	B 31, C1B31, C2B31, D21, D31, R21, R41, R61, C1B11*, C2B11*	0,80 m**	PF3
AR2	R11*, R42*, R62*	0,50 m	

* sous réserve d'une vérification sur la PF support de chaussée

** -0,10 à 0,15 m si géotextile adapté entre CForme et PST

1.2. Surclassement de PFi avec CForme en sol fin traité en place

ARi	Matériaux de CForme	h CForme	PFi
AR1	A3 traité chaux	0,50 m	PF2
	A1, A2, A3, traités chaux + ciment ou ciment seul	0,35 m	
	A3 traité chaux	0,70 m	PF3
	A1, A2, A3, traités chaux + ciment ou ciment seul	0,50 m	
AR2	A3 traité chaux	0,50 m	PF3
	A1, A2, A3, traités chaux + ciment ou ciment seul	0,35 m	

Nota bene : CForme réalisée en deux couches si $h \geq 0,50$ m

1.3. Surclassement de PFi avec CForme en MTLH

	Classe mécanique du matériau de CForme			
	3	4	5	
AR1	*	0,30 m	0,35 m	PF2
	0,30 m	0,35 m	0,50 m**	PF3
	0,40 m	0,45 m**	0,55 m	PF4
AR2	0,25 m	0,30 m	0,35 m	PF3
	0,30 m	0,35 m	0,45 m**	PF4

* $h_{min} = 0,30$ m permet un recloisement en PF3

** mise en œuvre en deux couches

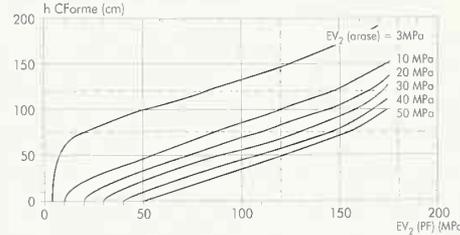
PLATE-FORME, SOL ET COUCHE GRANULAIRE (suite)

2. PLATE-FORME : ARASE DE TERRASSEMENT + COUCHE DE FORME

Arase de terrassement

Classes	AR1	AR2	AR3	AR4
Limites (MPa)	20	50	120	200

CForme non traitée :
 - matériaux concassés, E choisi suivant résultats sur plate-forme support
 - matériaux roulés, voir figure



3. COUCHE GRANULAIRE

Chaussée à faible trafic ($T \leq T3$)									
CBase	catégorie 1 $E_{GNT} = 600$ MPa catégorie 2 $E_{GNT} = 400$ MPa catégorie 3 $E_{GNT} = 200$ MPa								
CFand (divisée en sous-couches de 0,25 m)	E_{GNT} (sous-couche 1) = $k \times E$ plate-forme support E_{GNT} (sous-couche i) = $k \times E_{GNT}$ (sous-couche i-1) avec : <table border="1" style="display: inline-table; margin-left: 20px;"> <tr> <td>catégorie</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>3</td> <td>2,5</td> <td>2</td> </tr> </table> E_{GNT} est borné par la valeur indiquée en CBase	catégorie	1	2	3	k	3	2,5	2
catégorie	1	2	3						
k	3	2,5	2						

Chaussée à moyen trafic ($T2$ et $T3$) : structure GB/GNT	
CFond (divisée en sous-couches de 0,25 m)	E_{GNT} (sous-couche 1) = $3 \times E$ plate-forme support E_{GNT} (sous-couche i) = $3 \times E_{GNT}$ (sous-couche i-1) E_{GNT} est borné par 360 MPa

Chaussée à structure inverse	
	$E_{GNT} = 480$ MPa

4. VALEURS DE ν POUR LES SOLS, COUCHES GRANULAIRES ET CFORME

Matériaux non traités : $\nu = 0,35$

Matériaux traités : $\nu = 0,25$

MODULES DES MATÉRIAUX TRAITÉS

VALEURS INDICATIVES DE MODULE ET DE COEFFICIENT DE POISSON POUR LE CALCUL

Matériaux bitumineux

θ	E (θ °C ; 10 Hz) en MPa						E (15 °C) (MPa)	ν
	-10	0	10	20	30	40		
BBSG	14 800	12 000	7 200	3 600	1 300	1 000	5 400	0,35
GB 1	18 000	14 000	9 000	5 000	2 000	800	7 000	0,35
GB 2	23 000	18 800	12 300	6 300	2 700	1 000	9 300	0,35
GB 3	23 000	18 800	12 300	6 300	2 700	1 000	9 300	0,35
EME 1	30 000	24 000	17 000	11 000	6 000	3 000	14 000	0,35
EME 2	30 000	24 000	17 000	11 000	6 000	3 000	14 000	0,35

Matériaux traités aux liants hydrauliques

	E (MPa)	ν
GC	23 000	0,25
GCH	23 000	0,25
GCV	30 000	0,25
GLg	15 000	0,25
GLp	20 000	0,25
GLp + chaux	15 000	0,25
GLR	23 000	0,25
SC 3	17 200	0,25
2	12 000	0,25
1	5 000	0,25
SL 3	12 500	0,25
2	8 500	0,25
1	3 700	0,25
BCc	28 000	0,25

Bétons de ciment

Classe	E (MPa)	ν
BC5	35 000	0,25
4	24 000	0,25
3	24 000	0,25
2	20 000	0,25

TRAFIC

NOMBRE D'ESSEUX ÉQUIVALENTS NE

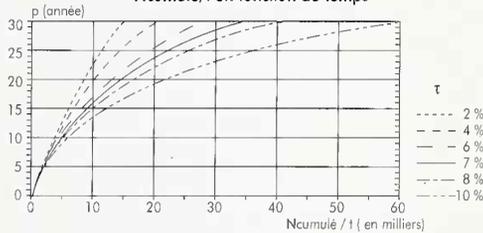
$$NE = MJA \times 365 \times \frac{(1 + \tau)^{p-1}}{\tau} \times CAM$$

CLASSE DE TRAFIC ET VALEURS DE MJA

En l'absence de toute autre information, on prend : MJA = centre de classe

Classes	T5	T4	T3	T2	T1	T0	TS	TEX
Centres (MJA)			85	200	500	1 200	3 000	
Limites (MJA)	0	25	50	150	300	750	2 000	5 000

Ncumulé/t en fonction du temps



CAS PARTICULIERS POUR LE CALCUL DE MJA

Chaussée à 2 voies	L < 5 m		5 m ≤ L < 6 m	
	L : largeur d'une voie	100%	75%	du trafic dans les deux sens

Chaussée à	lente			médiane			rapide				
	2 x 2 voies	2 x 3 voies milieu urbain	2 x 3 voies inter urbain	90 %	65 %	80 %	-	30 %	20 %	10 %	5 %

COEFFICIENT D'AGRESSIVITÉ CAM

Trafic faible	Classe	T5	T4	T3-	T3+
Tous matériaux	CAM	0,4	0,5	0,7	0,8

Trafic moyen et fort

Structure	CAM		Structure	CAM	
	h < 20 cm	h ≥ 20 cm		MB	MTLH
Bitumineuse	0,8	1,0	Mixte	0,8	1,3
			Inverse	0,8	1,0
Semi-rigide	1,3			1,0	1,3
Béton	1,3			1,0	1,3
Sols, GNT & GRH	1,0			1,0	1,3

SOLLICITATIONS ADMISSIBLES

MATÉRIAUX BITUMEUX

$$\epsilon_{t,od} = \epsilon_6 (10^\circ\text{C} ; 25 \text{ Hz}) \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \times \sqrt{\frac{E(10^\circ\text{C})}{E(\theta_{eq})}} \times k_c \times k_r \times k_s$$

MTLH ET CFOND POUR CHAUSSÉES BÉTON

$$\sigma_{t,od} = \sigma_6 \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \times k_c \times k_d \times k_r \times k_s$$

BÉTON DE CIMENT (COUCHE DE BASE)

$$\sigma_{t,od} = \sigma_6 \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \times k_c \times k_d \times k_r$$

COUCHE DE FORME TRAITÉE

$$\sigma_{t,od} = \sigma_6 \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b$$

SOLS, GNT ET GRH

$$\epsilon_{z,od} = A \times (NE)^{0,222}$$

Coefficient	Phénomène	Valeurs
k_c	colage	voir page 9
k_d	discontinuités (bord et fissures) et gradient thermique (dalles de béton)	1/1,70 pour BC 1/1,47 pour BAC et BCg 0,80 pour GCV 1 sinon
k_r	risque et dispersions	10-ubδ avec u : variable aléatoire (page 10) $\delta = \sqrt{[SN^2 + (cSh/b)^2]}$
k_s	défait de portance de PFI	1 pour PF3 1/1,1 pour PF2 1/1,2 pour PF1
A	déformation permanente	Fort trafic (Ti ≥ T3) Sol 12 000 Struc. inverse 14 400 Faible trafic (Ti < T3) Sol et GRH 16 000

CARACTÉRISTIQUES EN FATIGUE

VALEURS INDICATIVES POUR LES CALCULS

(voir le guide pour les relations entre résultats d'essais de laboratoire et paramètres de calcul)

Matériaux bitumineux

	$\epsilon_6 (10^\circ\text{C} ; 25 \text{ Hz}) (10^{-6})$	-1/b	SN	Sh	k_c
BBSG	100	5	0,25	(1)	1,1
GB 1	70	5	0,4	(1)	1,3
GB 2	80	5	0,3	(1)	1,3
GB 3	90	5	0,3	(1)	1,3
EME 1	100	5	0,3	(1)	1,0
EME 2	130	5	0,25	(1)	1,0

1. Sh dépend de l'épaisseur mise en œuvre : Sh = 0,01 m si h ≤ 0,10 m
Sh = 0,025 m si h ≥ 0,15 m ; Sh = 0,01 + 0,3*(h-0,10) si 0,10 ≤ h ≤ 0,15 m.

Matériaux traités aux liants hydrauliques

	σ_6 (MPa)	-1/b	SN	Sh (2)	k_c	
GC	0,75	15	1	0,03	1,4	
GCV	1,40	16	1	0,03	1,5	
GLg	0,60	12,5	1	0,03	1,5	
GLp	0,70	13,7	1	0,03	1,5	
GLp + choux	0,60	12,5	1	0,03	1,5	
GLR	0,75	15	1	0,03	1,4	
SC	3	0,75	12	0,8	0,025	1,5
	2	0,50	12	0,8	0,025	1,5
	1	0,21	12	0,8	0,025	1,5
SL	3	0,65	10	0,8	0,025	1,5
	2	0,425	10	0,8	0,025	1,5
	1	0,175	10	0,8	0,025	1,5
BCc	1,85	15	1	0,03	1,5	

2. Sh peut être réduit à 0,02 m si la plate-forme est de qualité (géométrie et portance) et la machine de répandage bien guidée.

Bétons de ciment

	σ_6 (MPa)	-1/b	SN	Sh	k_c	
BC	5	2,15	16	1	(3)	1,5
	4	1,95	15	1	(3)	1,5
	3	1,63	15	1	(3)	1,5
	2	1,37	14	1	(3)	1,5

3. Sh dépend du matériel de mise en œuvre

Type de matériel	A	B ou C
CBase sur CFond traitée	0,03 m	0,01 m
Autre cas	0,03 m	0,03 m

VALEURS DE RISQUE r (%)

		T0	T1	T2	T3
Structures usuelles	MB	2,0	5,0	12,0	25,0
	MTLH	2,5	5,0	7,5	12,0
Structures inverses	MB	2,0	5,0	12,0	25,0
	MTLH	5,0	10,0	15,0	24,0
Structures mixtes	MB	2,0	5,0	12,0	25,0
	MTLH	3,0	10,0	20,0	35,0
Structures en béton	CdBose	2,8	5,0	7,5	11,5
	CdFond souf BAC et BCg	5,6	10,0	15,0	23,0
	CdFond pour BAC et BCg	50,0	50,0	50,0	50,0

VALEURS DE U ASSOCIÉES AU RISQUE r

(loi normale)

r (%)	u	r (%)	u	r (%)	u
1	-2,326	5,6	-1,590	23	-0,739
1,5	-2,170	7,5	-1,439	24	-0,706
2	-2,054	10	-1,282	25	-0,674
2,5	-1,960	11,5	-1,200	30	-0,524
2,8	-1,911	12	-1,175	35	-0,385
3	-1,881	15	-1,036	40	-0,253
5	-1,645	20	-0,842	50	0

RELATIONS DIVERSES

Matériau	Valeurs indicatives des caractéristiques en fatigue des MTLH			Valeurs indicatives des coefficients de correspondance pour les performances mécaniques à un an		
	f _t /R _t	σ ₆ /f _t	σ ₆ /R _t	Age (j)	R _t /R _{t360}	E _t /E ₃₆₀
GC	1,8	0,525	0,95	28	0,60	0,65
GLR	-	-	-	60	0,65	0,70
GCH	-	-	-	60	0,60	0,65
GLg	2,0	0,48	0,96	90	0,70	0,70
GLg + choux	2,0	0,48	0,96	90	0,70	0,70
GLp	2,0	0,50	1,00	90	0,70	0,70
GCV + choux	1,8	0,53	0,95	90	0,65	0,75
Bc-GHHP	1,8	0,525	0,95	-	-	-
GPz	-	-	-	90	0,50	0,50
SL	2,0	0,42	0,85	180	0,85	0,85
SC	2,0	0,46	0,93	90	0,93	0,93
SCH-SLR	2,0	0,46	0,93	-	-	-
SCV-SPz	2,0	0,46	0,93	-	-	-

Valeurs pour le dimensionnement

Graves traitées	σ ₆ = 0,7 x (σ ₆ /R _t) x R _{t360}	E = 0,9 x E ₃₆₀
Sables traités	σ ₆ = 0,75 x (σ ₆ /R _t) x R _{t360}	E = 0,75 x E ₃₆₀
Béton	σ ₆ = 0,65 x f _t	

PRISE EN COMPTE DU GEL/DÉGEL

Principe : on doit vérifier que IA ≥ IR

Étape 1 : sensibilité au gel de la plate-forme support

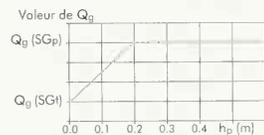
0,05			0,40			pente p de l'essai de gonflement		
SGn	SGp	SGt	[mm/(°C.h) ^{1/2}]					
(a)	(b)	(c)						
SGn	SGn h _n	SGn h _n						
	SGp au	SGp h _p						
	SGt	SGt						

(a) : pas de vérification au gel

(b) : $Q_g = \begin{cases} \inf(1/p; 4) & \text{si } p \leq 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

(c) : Q_g est fonction de h_p

$Q_{ng} = A_n \times h_n^2 / (h_n + 10)$ avec



Matériau	A	B et C	D	LTCC	CV SC SL
A _n (√°C x jour/cm)	0,15	0,13	0,12	0,14	0,17

Étape 2 : calcul de Q_M



Détermination de e et tel que : σ_{II} = 1,05 x σ_I puis Q_M = e/10

Étape 3 : Q_{PF} = Q_g + Q_{ng} + Q_M et Q_{PF} = √I_t

Étape 4 : protection thermique

Méthode simplifiée : $\sqrt{IS} = (1 + oh) \times \sqrt{I_t} + bh$

Matériaux	BB-GB	BC-GC-GL-GNT-GE	GCV	LTCC	SL-SC
a	0,008	0,008	0,012	0,012	0,012
b	0,06	0,10	0,13	0,14	0,15

Multicaouche : $a \times \sum h_i = \sum (a_i \times h_i)$ et $b \times \sum h_i = \sum (b_i \times h_i)$

Étape 5 : calcul de IA IA = IS / 0,7 + 10



AIDE-MÉMOIRE

**Annexe au guide technique
Conception et dimensionnement
des structures de chaussée**

Avertissement : cet aide-mémoire résume l'essentiel des valeurs numériques nécessaires au dimensionnement des structures de chaussées routières. Mais, seul, il ne suffit pas à expliciter la démarche de dimensionnement ; il faut pour cela se reporter au guide technique.

SOMMAIRE

MODÉLISATION

- Notations principales.....1
- Charge de référence.....2
- Structure.....2
- Couche de surface bitumineuse.....2
- Conditions d'interface.....3
- Plate-forme, sol et couche granulaire.....4
- Modules des matériaux traités.....6

VÉRIFICATION

- Trafic.....7
- Sollicitations admissibles.....8
- Caractéristiques en fatigue.....9
- Valeurs de risque r (%).....10
- Valeurs de u associées au risque r.....10
- Relations diverses.....10
- Prise en compte du gel/dégel.....11

Décembre 1994





CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSÉE

Guide technique

Les principes exposés dans ce document se rapportent à la conception des structures de chaussées routières (exception faite des chaussées non revêtues et des chaussées pavées). La méthode de dimensionnement s'applique, de par ses fondements, aux différentes catégories de routes, depuis les chaussées à faible trafic jusqu'aux structures autoroutières.

Le document explicite les étapes de la démarche du dimensionnement conduisant à la détermination des épaisseurs des différentes couches de la structure de chaussée pour la stratégie d'investissement et d'entretien retenue, et en fonction des objectifs de service, du trafic, et des conditions d'environnement. Il précise de quelle manière les paramètres de calcul sont rattachés aux propriétés physiques et mécaniques des matériaux, pour les différentes techniques de chaussée.

Document disponible sous la référence D 9511
au prix de 500 FF

- ou bureau de vente de l'IST-Publications ou LCPC
58, boulevard Lefebvre
F-75732 Paris CEDEX 15
téléphone 33 (1) 40 43 52 26
télécopie 33 (1) 40 43 54 95
- ou bureau de vente des Publications du SETRA
46, avenue Aristide-Briond – BP 100
F-92223 Bagneux CEDEX
téléphone 33 (1) 46 11 31 53 et 33 (1) 46 11 31 55
télécopie 33 (1) 46 11 33 55