

NF P98-086

octobre 2011

www.afnor.org

Ce document est à usage exclusif et non collectif des clients Saga Web.
Toute mise en réseau, reproduction et rediffusion, sous quelque forme que ce soit,
même partielle, sont strictement interdites.

This document is intended for the exclusive and non collective use of Saga Web customers.
All network exploitation, reproduction and re-dissemination, even partial, whatever the form
(hardcopy or other media), is strictly prohibited.



**DOCUMENT PROTÉGÉ
PAR LE DROIT D'AUTEUR**

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans accord formel.

Contacteur :
AFNOR – Norm'Info
11, rue Francis de Pressensé
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél : 01 41 62 76 44
Fax : 01 49 17 92 02
E-mail : norminfo@afnor.org

afnor

Saga Web

Pour AUTOROUTES DU MAROC

Client 90375200

le 13/2/2012 15:34

Diffusé avec l'autorisation de l'éditeur

Distributed under licence of the publisher

norme française

NF P 98-086

Octobre 2011

Indice de classement : **P 98-086**

ICS : 93.080.20

Dimensionnement structurel
des chaussées routières

Application aux chaussées neuves

E : Road pavement structural design — Application to new pavement
D : Oberbaudimensionierung für Verkehrsflächen — Anwendung auf neue
Fahrbahnen

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'AFNOR le 28 septembre 2011 pour prendre effet le 28 octobre 2011.

Remplace la norme homologuée NF P 98-086, de décembre 1992.

Correspondance

À la date de publication du présent document, il n'existe pas de travaux de normalisation internationaux ou européens traitant du même sujet.

Analyse

Le présent document définit la méthode de dimensionnement des structures neuves de chaussées routières applicable en France.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : route, chaussée, structure, calcul, charge, charge d'exploitation, modèle.

Modifications

Par rapport au document remplacé, révision de la norme.

Corrections



Chaussées — Terrassement — Dimensionnement et terminologie

BNSR CTD

Membres de la commission de normalisation

Président : M PIAU

Secrétariat : M PHAM DOAN — SETRA/CSEP

M	BALAY	IFSTTAR
M	BOULET	IFSTTAR
M	CASAN	SYNTEC INGENIERIE
M	COTARD	LRPC TOULOUSE
M	DAUBILLY	FNTP
M	DELAVAL	CETE NORD PICARDIE/CGI
MME	DELOFFRE	LRPC STRASBOURG
M	DELORME	LEM
M	DEPETRINI	SPECBEA
M	FONTANIER	SETRA/BNSR
MME	GIACOBI	ASFA
MME	GOYER	LRPC SAINT BRIEUC
M	GUIRAUD	SETRA/CSEP
M	HORNYCH	IFSTTAR
M	LAURENT	SPECBEA
M	LAYERLE	USIRF
M	LEFEUVRE	USIRF
MME	MAUDUIT	LRPC CLERMONT-FERRAND
M	NISSOUX	SPECBEA
M	ODEON	LRPC STRASBOURG
M	PIAU	IFSTTAR
M	RAVIER	SETRA/BNSR
M	SMERECKI	AFNOR
M	THEILLOUT	STAC
M	VARILLON	LRPC CLERMONT-FERRAND
M	VERHEE	USIRF

Sommaire

	Page
Avant-propos	7
1 Domaine d'application	7
2 Références normatives	7
3 Termes et définitions	9
3.1 Structures de chaussées routières	9
3.2 Sollicitations	11
3.3 Paramètres utilisés pour le dimensionnement au gel/dégel	11
4 Principe de la démarche de dimensionnement	12
5 Dimensionnement mécanique	14
5.1 Conversion trafic – Nombre d'essieux équivalents	14
5.2 Calcul des sollicitations admissibles	14
5.2.1 Critère de déformation admissible pour les matériaux bitumineux, $\varepsilon_{t,adm}$	14
5.2.2 Critère de contrainte admissible pour les matériaux traités aux liants hydrauliques et les bétons de ciment, $\sigma_{t,adm}$	15
5.2.3 Critère de déformation admissible pour les matériaux non traités et les sols supports de chaussée, $\varepsilon_{z,adm}$	15
5.2.4 Coefficients d'ajustement	16
5.3 Détermination des sollicitations induites dans la structure par la charge de référence	17
5.4 Comparaison entre sollicitations calculées dans la structure et sollicitations admissibles	18
6 Vérification au gel/dégel	18
6.1 Choix de l'hiver de référence	20
6.2 Calcul de l'indice de gel admissible IA	20
6.2.1 Sensibilité au gel du support de chaussée	20
6.2.2 Quantité de gel Q_g admissible, au sommet des matériaux gélifs du support	21
6.2.3 Protection thermique Q_{ng} apportée par les matériaux non gélifs de la plate-forme	22
6.2.4 Quantité de gel Q_M complémentaire autorisée par l'analyse du comportement mécanique de la structure en période de dégel	22
6.2.5 Quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme Q_{PF}	23
6.2.6 Protection thermique apportée par la structure de chaussée	23
6.2.7 Détermination de l'indice de gel atmosphérique admissible IA	25
6.3 Comparaison de l'indice de gel admissible et de l'indice de gel de référence	25
7 Données requises pour le dimensionnement des structures de chaussées neuves	25
7.1 Paramètres fixés en amont du projet	25
7.1.1 Durée de dimensionnement	25
7.1.2 Trafic poids lourd set taux de croissance	26
7.1.3 Risque de calcul	26
7.1.4 Hiver et indice de gel de référence	26
7.2 Le trafic poids lourds	26
7.2.1 Trafic Moyen Journalier Annuel	26
7.2.2 Trafic poids lourds cumulé et nombre équivalent d'essieux de référence	26
7.3 La plate-forme support de chaussée	27
7.3.1 La portance à long terme	28
7.3.2 Hétérogénéité de la plate-forme	28
7.3.3 Sensibilité au gel des matériaux situés sous la plate-forme	28
7.3.4 Protection thermique des matériaux non gélifs de la plate-forme	28
7.3.5 Cas des substratums rocheux	28

Sommaire

		Page
7.4	Propriétés des matériaux de chaussée prises en compte dans le dimensionnement	28
7.4.1	Les graves non traitées	28
7.4.2	Les matériaux traités aux liants hydrauliques et bétons compactés	29
7.4.3	Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés	29
7.4.4	Les bétons de ciment	30
8	Application de la méthode aux différentes familles de structures de chaussée	30
8.1	Vérification vis-à-vis de la plate-forme, commune à l'ensemble des structures de chaussée	30
8.2	Vérification vis-à-vis des couches de graves non traitées en assise	30
8.3	Les chaussées souples	31
8.3.1	Modélisation de la structure de chaussée	31
8.3.2	Critère de dimensionnement	31
8.4	Les chaussées bitumineuses épaisses	31
8.4.1	Modélisation de la structure de chaussée	31
8.4.2	Critères de dimensionnement	31
8.5	Les chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques	32
8.5.1	Modélisation de la structure de chaussée	32
8.5.2	Critères de dimensionnement	33
8.6	Les chaussées à structure mixte	33
8.6.1	Modélisation de la structure de chaussée	33
8.6.2	Critères de dimensionnement	33
8.7	Les chaussées à structure inverse	34
8.7.1	Modélisation de la structure de chaussée	34
8.7.2	Critères de dimensionnement	34
8.8	Les chaussées en béton de ciment	35
8.8.1	Modélisation de la structure de chaussée	35
8.8.2	Critères de dimensionnement	35
8.8.3	Dimensionnement des aciers	36
8.8.4	Cas de la structure dalle sur couche drainante	36
Annexe A	(informative) Définitions	37
A.1	Structures de chaussées routières	37
A.2	Paramètres utilisés pour le dimensionnement des chaussées	37
A.2.1	Trafic	37
A.2.4	Concepts utilisés pour le dimensionnement des chaussées	39
Annexe B	(normative) Choix de la couche de surface	40
B.1	Couche de roulement en enrobé	40
B.1.1	Chaussées où $NE \leq 250\ 000$ en rase campagne ou milieu péri-urbain	41
B.1.2	Chaussées où $NE > 250\ 000$ en rase campagne ou milieu péri-urbain	41
B.1.3	Chaussées urbaines	42
B.2	Couche de roulement en béton	42
Annexe C	(informative) Valeurs de coefficient d'agressivité moyen (CAM)	43
Annexe D	(normative) Prise en compte de la partie supérieure des terrassements et de la couche de forme dans le dimensionnement des chaussées	44
D.1	Plate-forme de chaussée	44
D.2	Coefficient d'hétérogénéité de plate-forme pris en compte lors du dimensionnement	44
D.3	Comportement au gel des matériaux constitutifs de la plate-forme	44

Sommaire

	Page
Annexe E (informative) Les choix de maîtrise d'ouvrage	46
E.1 Durée de dimensionnement	46
E.2 Risque de calcul	46
E.2.1 Valeurs de risque indicatives	46
E.2.2 Relation entre u , fractile de la loi normale et r , risque de dimensionnement	47
E.3 Indice de gel de référence	47
E.4 Distribution par voie du trafic poids lourds	48
E.5 Définition des classes de trafic T_i	48
Annexe F (normative) Caractéristiques des matériaux de chaussées pour le dimensionnement :	
partie normative	49
F.1 Les graves non traitées	49
F.2 Les matériaux traités aux liants hydrauliques	50
F.2.1 Graves traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques et bétons compactés routiers	50
F.2.2 Sables traités aux liants hydrauliques	50
F.2.3 Éléments communs aux matériaux traités aux liants hydrauliques	51
F.3 Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés	51
F.3.1 Généralités	51
F.3.2 Éléments communs aux matériaux traités aux liants hydrocarbonés	52
F.3.3 Les graves-bitume (EB-GB)	53
F.3.4 Les enrobés à module élevé (EB-EME)	54
F.3.5 Matériaux hydrocarbonés pour couches de liaison et de roulement	54
F.4 Les bétons de ciment	56
Annexe G (informative) Caractéristiques des matériaux de chaussées pour le dimensionnement :	
partie informative	58
G.1 Les graves non traitées	58
G.2 Les matériaux traités aux liants hydrauliques	59
G.2.1 Loi de fatigue commune aux matériaux traités aux liants hydrauliques	59
G.2.2 Graves traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques et bétons compactés routiers	59
G.2.3 Sables traités aux liants hydrauliques	60
G.3 Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés	61
G.3.1 Loi de fatigue	61
G.3.2 Module de rigidité des matériaux bitumineux à 10 °C, 10 Hz	61
G.4 Les bétons de ciment	62
G.4.1 Loi de fatigue	62
G.5 Paramètres des matériaux de chaussées liés au gel	62
Annexe H (normative) Dispositions constructives spécifiques liées au dimensionnement	64
H.1 Règles d'épaisseurs sur les matériaux	64
H.1.1 Grave Non Traitée	64
H.1.2 Matériaux traités aux liants hydrauliques	64
H.1.3 Matériaux traités aux liants hydrocarbonés	64
H.2 Surlargeurs des couches de chaussée	64
H.2.1 Structures bitumineuses ou à assise traitée aux liants hydrauliques	64
H.2.2 Structures en béton de ciment	65
H.3 Spécificités liées aux différentes structures de chaussée	65
H.3.1 Structure bitumineuse épaisse	65
H.3.2 Structure semi-rigide	65
H.3.3 Structure inverse	65

Sommaire

	Page
Annexe I (informative) Calcul de la température équivalente pour les matériaux bitumineux	66
Annexe J (normative) Hypothèses du modèle de conduction thermique pour le dimensionnement au gel	67
Annexe K (informative) Détermination d'un coefficient de calage k_c	69
K.1 Objet	69
K.2 Méthodologie	69
Annexe L (informative) Cas tests de structures pour la validation de la méthode de calcul des contraintes et déformations	70
L.1 Structure souple	70
L.2 Structure bitumineuse épaisse	71
L.3 Structure semi-rigide	71
L.4 Structure rigide	72
Annexe M (informative) Symboles et abréviations	73
M.1 Matériaux	73
M.2 Paramètres de dimensionnement	74
M.3 Support de chaussée	74
M.4 Essais et grandeurs mesurées	74
M.5 Trafic	75
M.6 Vérification au gel-dégel	75
Bibliographie	76

Avant-propos

Le présent document définit la méthode de dimensionnement des structures neuves de chaussées routières applicable en France.

Il décrit les principes de la méthode de dimensionnement, les paramètres d'entrée nécessaires à son application, les propriétés des matériaux utilisés et développe pour chaque famille de structures de chaussée, la démarche de dimensionnement. Il intègre également la démarche de vérification au gel.

La réalisation des travaux de construction des chaussées n'est pas traitée dans ce document. Cependant, les dispositions constructives liées à la conception des chaussées sont fournies en annexe.

1 Domaine d'application

Le présent document s'applique aux chaussées neuves ouvertes à la circulation des poids lourds et des automobiles pour un trafic minimal T5 ou de plus de 50 000 essieux équivalents.

Il concerne les différents types de structures de chaussées : souples, bitumineuses épaisses, semi-rigides, mixtes, inverses, en béton de ciment.

Il ne concerne que les matériaux de chaussées normalisés pour les couches d'assises et de surface. Les cas d'emploi de graves-émulsion, de matériaux modulaires, de matériaux à froid ne sont pas traités dans cette norme.

Ce document est limité au calcul des épaisseurs des couches : il ne traite ni du profil en long, ni du profil en travers des chaussées.

La méthode normalisée est applicable aux voiries urbaines hormis les chaussées comportant des particularités de centre villes (présence de réseaux enterrés significatifs et ramifiés, par exemple).

De la même façon, les éléments permettant de prendre en compte les charges particulières (aéronefs, chariots porte container, transports en commun en site propre avec ou sans rails, charges statiques, etc.), ne figurent pas dans ce document.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

NF P 11-300, *Exécution des terrassements — Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.*

NF P 18-545, *Granulats — Éléments de définition, conformité et codification.*

NF P 94-117-1, *Sols : reconnaissance et essais — Portance des plates-formes — Partie 1 : Module sous chargement statique à la plaque (EV2).*

NF P 94-117-2, *Sols : reconnaissance et essais — Portance des plates-formes — Partie 2 : Module sous chargement dynamique.*

NF P 98-080-1, *Chaussées — Terrassements — Terminologie — Partie 1 : Terminologie relative au calcul de dimensionnement des chaussées.*

NF P 98-082, *Chaussées — Terrassements — Dimensionnement des chaussées routières — Détermination des trafics routiers pour le dimensionnement des structures de chaussées.*

NF P 98-114-2, *Assises de chaussées — Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques — Partie 2 : Sables traités aux liants hydrauliques.*

NF P 98-150-1, *Enrobés hydrocarbonés — Exécution des assises de chaussées, couches de liaison et couches de roulement — Partie 1 : Enrobés hydrocarbonés à chaud — Constituants, formulation, fabrication, transport, mise en œuvre et contrôle sur chantier.*

NF P 98-170, *Chaussées en béton de ciment — Exécution et contrôle.*

NF P 98-233-1, *Essais relatifs aux chaussées — Détermination du comportement en fatigue des matériaux traités aux liants hydrauliques — Partie 1 : Essai par flexion à amplitude de contrainte constante.*

NF P 98-234-2, *Essais relatifs aux chaussées — Comportement au gel — Partie 2 : Essai de gonflement au gel des sols et matériaux granulaires traités ou non de $D \leq 20$ mm.*

NF P 98-734, *Matériels de construction et d'entretien des routes — Machines de répannage des mélanges granulaires — Machine à coffrage glissant pour la mise en place du béton de ciment — Terminologie — Prescriptions.*

NF EN 206-1, *Béton — Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité (indice de classement : P 18-325-1).*

NF EN 12390-3, *Essai pour béton durci — Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes (indice de classement : P 18-455).*

NF EN 12390-6, *Essai pour béton durci — Partie 6 : Résistance en traction par fendage d'éprouvettes (indice de classement : P18-434).*

NF EN 12697-24+A1, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 24 : Résistance à la fatigue (indice de classement : P 98-818-24).*

NF EN 12697-25, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 25 : Essai de compression cyclique (indice de classement : P 98-818-25).*

NF EN 12697-26, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 26 : Module de rigidité (indice de classement : P 98-818-26).*

NF EN 13108-1, *Mélanges bitumineux — Spécifications des matériaux — Partie 1 : Enrobés bitumineux (indice de classement : P 98-819-1).*

NF EN 13108-2, *Mélanges bitumineux — Spécifications des matériaux — Partie 2 : Bétons bitumineux très minces (indice de classement : P 98-819-2).*

NF EN 13108-6, *Mélanges bitumineux — Spécifications des matériaux — Partie 6 : Asphalte coulé routier (indice de classement : P 98-819-6).*

NF EN 13108-7, *Mélanges bitumineux — Spécifications des matériaux — Partie 7 : Bétons bitumineux drainants (indice de classement : P 98-819-7).*

prNF EN 13108-9, *Mélanges bitumineux — Spécifications des matériaux — Partie 9 : Béton bitumineux ultra-mince (BBUM) (indice de classement : P 98-819-9).¹⁾*

NF EN 13108-20, *Mélanges bitumineux — Spécifications des matériaux — Partie 20 : Épreuve de formulation (indice de classement : P 98-819-1) (indice de classement : P 98-819-20).*

NF EN 13285, *Graves non traitées — Spécifications (indice de classement : P 98-845).*

NF EN 13286-40, *Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques — Partie 40 : Méthode d'essai de détermination de la résistance à la traction directe des mélanges traités aux liants hydrauliques (indice de classement : P 98-846-40).*

1) En préparation.

NF EN 13286-43, *Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques — Partie 43 : Méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants hydrauliques* (indice de classement : P 98-846-43).

NF EN 13877-1, *Chaussées en béton — Partie 1 : Matériaux* (indice de classement : P 98-870-1).

NF EN 13877-3, *Chaussées en béton — Partie 3 : Spécifications relatives aux goujons à utiliser dans les chaussées en béton* (indice de classement : P 98-870-3).

NF EN 14227-1, *Mélanges traités aux liants hydrauliques — Spécifications — Partie 1 : Mélanges granulaires traités au ciment* (indice de classement : P 98-887-1).

NF EN 14227-2, *Mélanges traités aux liants hydrauliques — Spécifications — Partie 2 : Mélanges traités au laitier* (indice de classement : P 98-887-2).

NF EN 14227-3, *Mélanges traités aux liants hydrauliques — Spécifications — Partie 3 : Mélanges traités à la cendre volante* (indice de classement : P 98-887-3).

NF EN 14227-5, *Mélanges traités aux liants hydrauliques — Spécifications — Partie 5 : Mélanges traités au liant hydraulique routier* (indice de classement : P 98-887-5).

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions présents dans les normes listées ci-dessus s'appliquent et sont rappelés en Annexe A en tant que de besoin pour le présent document. Sont également utilisés les termes et définitions suivants.

3.1 Structures de chaussées routières

3.1.1

structure de chaussée

ensemble de couches superposées de matériaux reposant sur la plate-forme support de chaussée, destinées à répartir sur le sol naturel les efforts dus à la circulation des véhicules (Figure 1). Les définitions des différentes couches de chaussée sont fournies en Annexe A

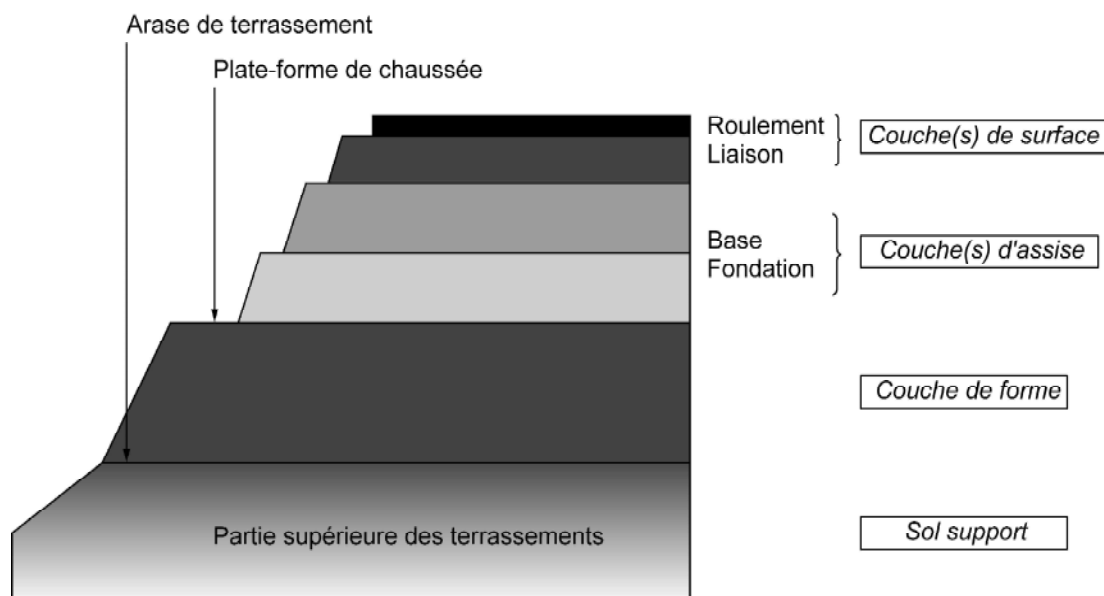


Figure 1 — Représentation schématique d'une structure de chaussée

3.1.2

partie supérieure des terrassements

zone supérieure d'environ 1 m d'épaisseur des terrains en place (cas des déblais) ou des matériaux rapportés (cas des remblais). Elle sert de support à la couche de forme ou, en son absence, aux couches de chaussées

3.1.3

arase de terrassement

surface de la partie supérieure des terrassements (PST) supportant la couche de forme (dans le cas où elle est présente)

3.1.4

couche de forme

couche située entre la partie supérieure des terrassements et les couches de chaussées, permettant d'homogénéiser les caractéristiques du sol support, d'atteindre et de pérenniser les performances géométriques, mécaniques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception et le calcul de dimensionnement de la chaussée. La couche de forme peut être constituée de matériaux en place ou rapportés, traités ou non traités

3.1.5

plate-forme de chaussée

surface de la couche de forme supportant les couches de chaussées. Dans le cas où la couche de forme n'est pas présente, la plate-forme se confond avec l'arase de terrassement

3.1.6

structures souples

structures comportant une couverture en matériaux bitumineux d'épaisseur inférieure ou égale à 0,12 m, parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic ou à un béton bitumineux souple, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités

3.1.7

structures bitumineuses épaisses

structures composées d'une couche de surface et d'une couche de base en matériaux bitumineux ; la couche de fondation peut être en matériaux bitumineux ou en grave non traitée. L'épaisseur totale de matériaux bitumineux est supérieure à 0,12 m

3.1.8

structures à assises traitées aux liants hydrauliques ou semi-rigides

structures composées d'une ou plusieurs couches en matériaux bitumineux sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques

3.1.9

structures mixtes

structures composées d'une couche de roulement et d'une couche de base en matériaux bitumineux sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. Le rapport K de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée est compris entre 0,4 et 0,5

3.1.10

structures inverses

structures composées de couches bitumineuses, sur une couche en grave non traitée d'épaisseur comprise entre 0,10 m et 0,12 m, reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques

3.1.11

structures en béton de ciment

structures comportant une couche de base-roulement en béton de ciment de plus de 0,12 m

3.1.12

chaussées urbaines

chaussées faisant partie intégrante d'une agglomération. Habituellement, il est retenu quatre catégories indicatives de voies : les voies de desserte à circulation réduite, les voies de distribution, les voies principales, les voies réservées aux transports en commun (non traitées dans ce document) [6]. Ces catégories peuvent évoluer selon les agglomérations considérées, dans le cas où celles-ci disposent d'un catalogue spécifique de structures

3.1.13

chaussées en rase campagne ou en milieu péri-urbain

ensemble des chaussées routières à l'exclusion des chaussées urbaines

3.1.14

interface

surface de contact entre deux couches de chaussées, de même nature ou de nature différente. Dans la méthode de dimensionnement, le fonctionnement mécanique des interfaces peut être de type collé, glissant ou semi-collé en fonction des matériaux en contact. Les interfaces sont aussi supposées fermées, la prise en compte de situations physiques autres étant assurée par l'intermédiaire de coefficients d'ajustement

3.1.15

interface collée

l'ensemble des déplacements est supposé continu, il en est de même pour les déformations dans le plan de l'interface

3.1.16

interface glissante

les contraintes de cisaillement horizontales sont supposées nulles. Les déformations dans le plan de l'interface sont alors discontinues

3.1.17

interface semi-collée

hypothèse de calcul correspondant à la demi-somme des résultats obtenus successivement avec interface collée et interface glissante

3.2 Sollicitations

3.2.1

sollicitations

contraintes ou déformations élastiques issues du calcul de la structure de chaussée

3.2.2

sollicitation admissible de contrainte ou de déformation dans une couche de chaussée

intensité de contrainte ou de déformation élastique dans une couche de chaussée, à ne pas dépasser

3.3 Paramètres utilisés pour le dimensionnement au gel/dégel

3.3.1

indice de gel

indice lié, pour un lieu et une période donnés, à la valeur absolue de la somme des températures moyennes journalières négatives. Il s'exprime en degrés Celsius \times jour ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$). La méthode de calcul de l'indice de gel est développée dans la norme NF P 98-080-1

3.3.2

quantité de gel

racine carrée d'indice de gel

3.3.3

indice de gel admissible IA

indice de gel atmosphérique calculé que peut supporter une chaussée associé à l'endommagement défini préalablement au projet

3.3.4

indice de gel de référence IR

indice de gel atmosphérique choisi pour le dimensionnement de la chaussée, en fonction de la localisation géographique du projet

3.3.5

sensibilité au gel

grandeur caractérisant le comportement d'un sol ou d'un matériau granulaire aux effets du gel/dégel. Elle est appréciée par l'essai de gonflement au gel, selon la norme NF P 98-234-2

3.3.6

barrière de dégel

réglementation de la circulation routière, éventuellement mise en œuvre en phase de dégel, afin de protéger la structure de la chaussée. Elle se traduit généralement par une limitation du tonnage

4 Principe de la démarche de dimensionnement

La méthode de dimensionnement des chaussées comporte un dimensionnement mécanique et un dimensionnement au gel de la structure.

Le dimensionnement mécanique consiste à vérifier que la structure choisie est apte à supporter le trafic poids lourds cumulé, déterminé pour la durée de dimensionnement fixée. Le trafic lié aux véhicules légers est supposé avoir un impact négligeable.

La vérification porte sur la comparaison entre :

- des grandeurs mécaniques (contraintes, déformations) représentatives du comportement de la structure de chaussées au passage d'un essieu de référence, et calculées en utilisant un modèle élastique linéaire ;
- des valeurs admissibles de ces mêmes grandeurs, fonction de la résistance mécanique des matériaux sous chargements répétés auxquelles sont associées divers coefficients d'ajustement rendant compte notamment du caractère probabiliste de la démarche de dimensionnement et des discontinuités des chaussées rigides.

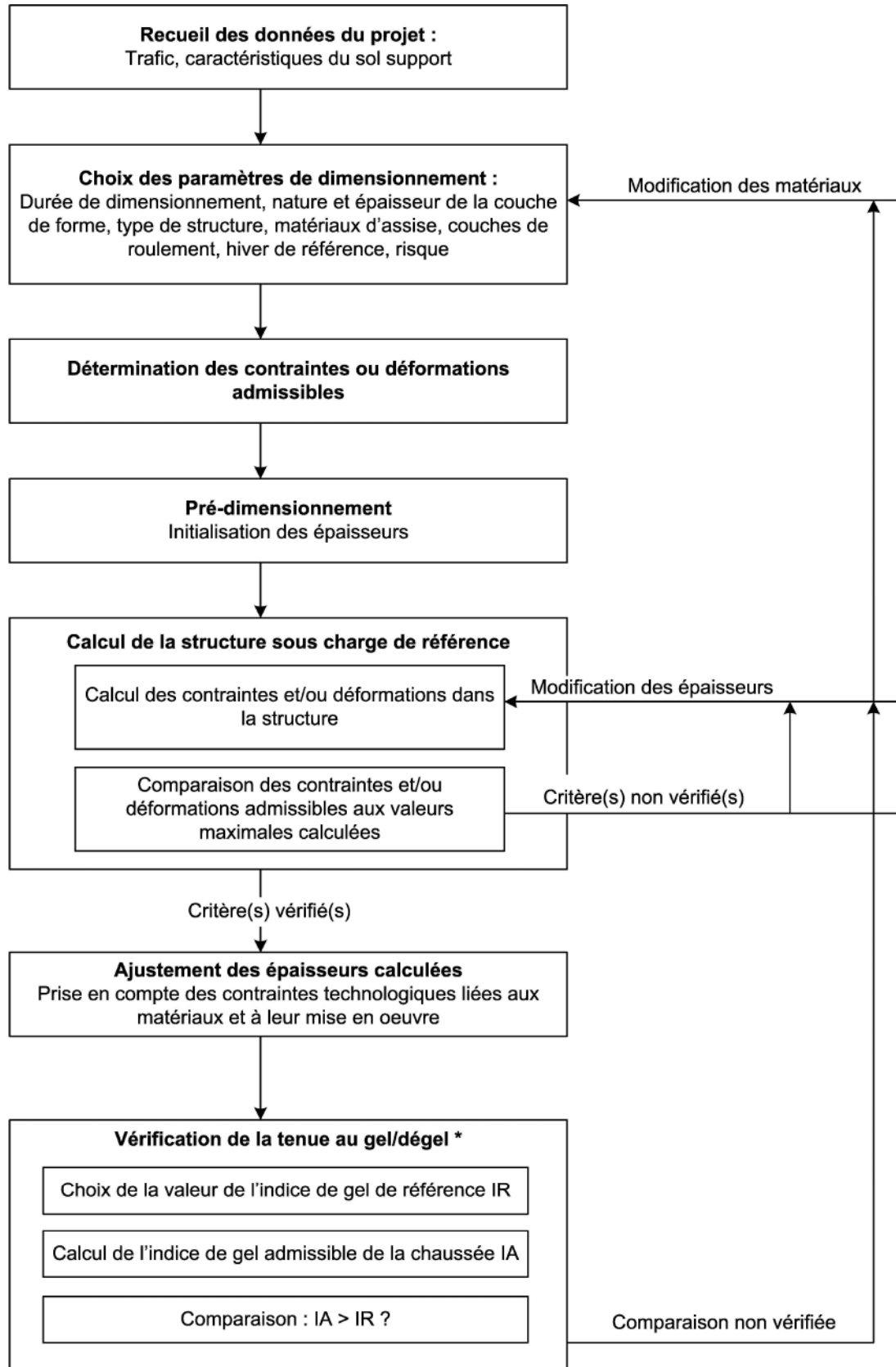
Les sollicitations calculées dans la chaussée doivent alors être inférieures ou égales aux sollicitations admissibles. La détermination de l'épaisseur minimale des couches se fait par itérations successives de façon à respecter ce critère.

La structure issue du calcul mécanique est ensuite soumise à une vérification au gel/dégel. La méthode repose sur le calcul de l'indice de gel admissible par la chaussée qui doit être supérieur à l'indice de gel de l'hiver pris en référence. Cette étape peut conduire à modifier les épaisseurs issues du calcul mécanique. Si l'augmentation des épaisseurs ne permet pas de dimensionner la structure de chaussée, les matériaux de chaussée ou constitutifs du sol et éventuellement de la couche de forme peuvent être modifiés.

In fine, les épaisseurs des couches sont ajustées pour intégrer les contraintes technologiques de mise en œuvre (des indications sont fournies en Annexe F et en Annexe G).

Le dimensionnement d'une chaussée nécessite au préalable de définir les données du projet et le choix d'un certain nombre de paramètres de dimensionnement. Il est nécessaire notamment de fixer le risque, la durée de dimensionnement, les hypothèses de trafic et l'hiver de référence pour la vérification au gel.

La démarche est explicitée à travers la Figure 2.



* Vérification optionnelle

Figure 2 — Schéma de principe de la méthode de dimensionnement des chaussées neuves routières

5 Dimensionnement mécanique

Le dimensionnement mécanique de la structure repose sur :

- l'assimilation du trafic poids lourd pris en compte dans le projet à un nombre de cycles de chargement NE de l'essieu de référence (essieu simple à roues jumelées dont la charge totale est fixée à 130 kN — NF P 98-082) ;
- le calcul des sollicitations admissibles fonction à la fois de la valeur de NE , des risques de déformations permanentes de la plate-forme et des couches non liées et des risques de fatigue des couches liées (bitumineuses ou hydrauliques) ;
- le calcul des sollicitations induites dans la structure par la charge de référence (demi-essieu à roues jumelées chargé à 65 kN — NF P 98-082) à l'aide d'un modèle élastique linéaire multi-couches, homogène et isotrope (modèle de Burmister) pour lequel la rigidité des matériaux est caractérisée par un module d'Young et un coefficient de Poisson. Le sol et éventuellement la couche de forme sont représentés par une couche semi-infinie dont le module d'Young correspond au module de rigidité de la classe de plate-forme considérée ;
- le choix d'une fréquence de sollicitation ou d'un temps de charge et d'une température équivalente pour les matériaux bitumineux permettant à partir de règles établies en laboratoire, de préciser les propriétés matériaux à retenir dans l'application de la méthode de dimensionnement. Dans le cas général, la fréquence de sollicitation considérée est prise égale à 10 Hz, et le temps de charge pris égal à 0,02 s. La température équivalente θ_{eq} est définie comme la température constante conduisant au même dommage cumulé annuel de la structure que celui subi par la chaussée sous l'effet des variations réelles de température au cours d'une année. La valeur de la température équivalente adoptée en France métropolitaine pour le dimensionnement des chaussées comprenant des couches bitumineuses est $\theta_{eq} = 15$ °C. Le principe de calcul de la température équivalente pour d'autres conditions climatiques est présenté en Annexe I.

5.1 Conversion trafic – Nombre d'essieux équivalents

Le trafic poids lourds devant emprunter la chaussée pendant sa durée de dimensionnement, exprimé par le nombre cumulé de poids lourds N_{PL} , est converti en un nombre équivalent NE de passages de l'essieu de référence (NF P 98-082). Le calcul est précisé au paragraphe 7.2. Il est basé sur le produit du nombre N_{PL} par un coefficient d'équivalence appelé Coefficient d'Aggressivité Moyen du trafic, noté CAM , dont la valeur dépend de la nature de la structure de chaussée et de la composition du trafic Poids Lourds (silhouettes des poids lourds et fréquences de passage). La méthode de calcul de ce coefficient est développée dans la norme NF P 98-082. Elle doit être utilisée notamment dans le cas des zones de trafic recevant des poids lourds dérogeant au Code de la Route français ou à la directive européenne n° 96/53/CE. Pour les autres zones et en l'absence des informations nécessaires pour mener un tel calcul, les valeurs du coefficient CAM fournies en Annexe C peuvent être utilisées.

5.2 Calcul des sollicitations admissibles

La méthode de dimensionnement distingue trois mécanismes d'endommagement auxquels sont associées trois expressions de sollicitations admissibles :

- l'endommagement par fatigue des matériaux bitumineux, pris en compte à travers leur déformation d'extension horizontale réversible maximale admissible $\varepsilon_{t,adm}$;
- l'endommagement par fatigue des matériaux traités aux liants hydrauliques et les bétons de ciment, pris en compte à travers leur contrainte de traction horizontale maximale admissible $\sigma_{t,adm}$;
- l'endommagement par cumul des déformations permanentes dans les matériaux non traités, pris en compte à travers leur déformation verticale réversible maximale admissible $\varepsilon_{z,adm}$.

5.2.1 Critère de déformation admissible pour les matériaux bitumineux, $\varepsilon_{t,adm}$

Pour une couche bitumineuse sollicitée en extension par flexion, la déformation admissible pour la température équivalente θ_{eq} est calculée selon l'Équation 1.

Équation 1 : équation de la déformation admissible pour les matériaux bitumineux

$$\varepsilon_{t,adm} = \varepsilon_6(10\text{ °C} ; 25\text{ Hz}) \times \sqrt{\frac{E(10\text{ °C} ; 10\text{ Hz})}{E(\theta_{eq} ; 10\text{ Hz})}} \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \times k_c \times k_r \times k_s$$

où :

$\varepsilon_6(10\text{ °C} ; 25\text{ Hz})$ est le paramètre de la loi de fatigue du matériau bitumineux, représentant la déformation conduisant à une durée de vie de 10^6 cycles. ε_6 est déterminé par l'essai normalisé de fatigue en flexion deux points (NF EN 12697-24, Annexe A). Cet essai est réalisé à 10 °C et 25 Hz ;

b est la pente de la loi de fatigue du matériau bitumineux ($-1 < b < 0$) ;

$E(10\text{ °C} ; 10\text{ Hz})$ est le module de rigidité obtenu selon la norme NF EN 12697-26, Annexe A à 10 °C et 10 Hz ou selon la norme NF EN 12697-26, Annexe F ;

$E(\theta_{eq} ; 10\text{ Hz})$ est le module de rigidité obtenu selon la norme NF EN 12697-26, Annexe A à θ_{eq} et 10 Hz ou selon la norme NF EN 12697-26, Annexe F ;

NE est le nombre de passages de l'essieu de référence ;

k_c, k_r, k_s sont les coefficients d'ajustement définis au paragraphe 5.2.4, et dont les valeurs sont fournies en Annexe D et Annexe F.

5.2.2 Critère de contrainte admissible pour les matériaux traités aux liants hydrauliques et les bétons de ciment, $\sigma_{t,adm}$

Pour une couche constituée par ces matériaux, sollicitée en traction par flexion, la contrainte admissible est calculée selon l'Équation 2.

Équation 2 : équation de la contrainte admissible pour les matériaux traités aux liants hydrauliques

$$\sigma_{t,adm} = \sigma_6 \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \times k_c \times k_r \times k_s \times k_d$$

où :

σ_6 est le paramètre représentant la contrainte conduisant à une durée de vie en fatigue par flexion de 10^6 cycles sur des éprouvettes dont le mûrissement est de 360 jours (NF P 98-233-1) ;

b est la pente de la loi de fatigue du matériau ($-1 < b < 0$) ;

NE est le nombre de passages de l'essieu de référence ;

k_c, k_r, k_s, k_d sont les coefficients d'ajustement définis au paragraphe 5.2.4 et dont les valeurs sont fournies en Annexe D et Annexe F.

5.2.3 Critère de déformation admissible pour les matériaux non traités et les sols supports de chaussée, $\varepsilon_{z,adm}$

Pour une couche de matériau non traité et pour le sol, la sollicitation admissible est la déformation verticale en surface de la couche, calculée selon l'Équation 3.

Équation 3 : équation de la déformation admissible pour les matériaux non traités et les sols supports de chaussée

$$\varepsilon_{z,adm} = A \times (NE)^b$$

où :

A, b sont les paramètres fonction du niveau de trafic, du type de matériau et de la structure, définis au paragraphe 8.1 ($-1 < b < 0$) ;

NE est le nombre de passages de l'essieu de référence.

5.2.4 Coefficients d'ajustement

Pour le critère de fissuration par fatigue des couches traitées aux liants bitumineux ou hydrauliques, différents coefficients k_r , k_s , k_d et k_c viennent ajuster la valeur de la déformation ou de la contrainte admissible. Ceux-ci sont définis dans les paragraphes suivants.

5.2.4.1 Coefficient de risque k_r

La méthode de dimensionnement intègre, à travers le coefficient de risque r , une approche probabiliste de la durée de vie de la chaussée compte tenu des dispersions sur les propriétés mécaniques des matériaux et sur les épaisseurs de couches de chaussées. Ces deux phénomènes étant supposés suivre des lois normales indépendantes, la loi résultante est une loi normale. Celle-ci est prise en compte à travers le risque de calcul r dont la valeur fait partie des données du projet et est définie comme suit.

Le risque représente pour la période de dimensionnement, l'espérance (au sens de la théorie des probabilités) de la proportion linéique de chaussée à reconstruire en l'absence de toute intervention d'entretien structurel dans l'intervalle.

À cette valeur de risque r est associée la valeur de la variable centrée réduite notée u dont la relation est fournie en Annexe E. Celle-ci permet de calculer le coefficient de risque k_r (Équation 4) qui corrige la valeur de déformation ou de contrainte admissible en fonction du risque de calcul r retenu.

Équation 4 : calcul du coefficient de risque k_r

$$k_r = 10^{-u \times b \times \delta} \text{ et } \delta = \sqrt{S_N^2 + \left(\frac{c \times S_h}{b}\right)^2}$$

avec :

- u est la valeur de la variable aléatoire de la loi normale centrée réduite associée au risque r . La relation entre u et r et le tableau de passage de l'un à l'autre sont donnés en Annexe E ;
- b est la pente de la droite de fatigue du matériau de la couche considérée dont les valeurs, pour chaque classe de matériaux, sont fournies en Annexe F ($-1 < b < 0$) ;
- S_N est l'écart type sur le logarithme décimal du nombre de cycles entraînant la rupture par fatigue dont les valeurs, pour chaque classe de matériaux, sont fournies en Annexe F ;
- S_h est l'écart type sur l'épaisseur des couches d'assises de matériaux mise en œuvre exprimé en mètres dont les valeurs, pour chaque classe de matériaux, sont fournies en Annexe F ;
- c est le coefficient associant la variation de déformation à la variation d'épaisseur de la chaussée exprimé en m^{-1} . La valeur de c fixée à partir de l'étude de structures usuelles est égale à $2 m^{-1}$.

5.2.4.2 Coefficient de plate-forme k_s

Le coefficient k_s intègre les éventuelles hétérogénéités de portance de la plate-forme support qui sont d'autant plus préjudiciables pour la structure que la portance de la plate-forme est faible. Ce coefficient n'affecte que la couche reposant sur la plate-forme et est fonction de la portance de cette dernière.

Les valeurs de k_s sont données en Annexe D.

5.2.4.3 Coefficient de discontinuité k_d

Dans le cas des chaussées rigides ou plus généralement constituées de matériaux traités aux liants hydrauliques, l'utilisation d'un modèle de chaussée continu ne permet pas de prendre explicitement en compte les discontinuités entre dalles ou générées par les fissures de retrait. Or celles-ci conduisent à des concentrations de contraintes et à des conditions d'appui et d'engrènement variables au cours du temps, en fonction notamment des variations de température saisonnières et des gradients thermiques journaliers. Le rôle du coefficient de discontinuité, noté k_d , évalué à l'aide de calculs aux éléments finis, est d'intégrer ces effets de majoration de contrainte, en permettant ainsi de ramener le calcul des chaussées discontinues au modèle élastique linéaire continu. Ce coefficient est pris en compte dans le calcul des contraintes admissibles de la couche de base.

Les valeurs de k_d sont données en Annexe F.

5.2.4.4 Coefficient de calage k_c

Le coefficient de calage, noté k_c , corrige l'écart entre les prédictions de la démarche de calcul et l'observation du comportement des chaussées réelles.

L'emploi direct des valeurs de k_c fournies en Annexe F dans le cas de modèles de calcul ou de protocoles d'essais en fatigue différents de ceux décrits dans ce document, n'est pas normalisé.

La détermination d'une valeur de coefficient de calage pour une température équivalente différente de 15 °C 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 K du présent document précise l'approche à adopter pour déterminer les coefficients de calage.

5.3 Détermination des sollicitations induites dans la structure par la charge de référence

Les calculs de sollicitations induites au sein de la structure de chaussée sous la charge de référence sont réalisés à l'aide d'un modèle multi-couches élastique linéaire semi-infini (modèle de Burmister).

Ce modèle décrit l'ensemble de la structure de chaussée par une succession de couches, d'épaisseurs finies et constantes en plan. Seule la couche inférieure dont la limite supérieure correspond à la plate-forme est infinie en profondeur. Chaque couche est constituée d'un matériau homogène isotrope au comportement élastique linéaire caractérisé par un module d'Young noté E et un coefficient de Poisson noté ν . Les conditions d'interfaces sont soit collées, soit glissantes en fonction des matériaux en contact. L'hypothèse d'interface semi-collée est prise par définition égale à la demi-somme des résultats obtenus successivement avec une interface collée et une interface glissante.

Les valeurs des paramètres mécaniques (E , ν) à considérer en fonction de la nature des matériaux sont données en Annexe F. Les conditions d'interfaces, fonction de la nature des matériaux en contact, sont définies dans l'Article 8 de ce document.

Le calcul est conduit pour la charge de référence correspondant au demi-essieu à roues jumelées de 65 kN. Elle est représentée par deux disques de rayon 0,125 m, dont les centres sont distants de 0,375 m et appliquant une pression uniforme en surface de chaussée de 0,662 MPa (Figure 3).

Les sollicitations (contraintes et déformations réversibles) sont calculées à la base des couches de matériaux liés et au sommet des couches non liées, pour l'ensemble des points situés aux endroits les plus critiques de la structure : aplomb des centres de charge ou aplomb du centre de gravité du demi-essieu de référence (Figure 3). Les valeurs retenues pour le dimensionnement sont les valeurs extrêmes de contrainte ou de déformation pour chaque couche de chaussée relevant d'un critère de dimensionnement.

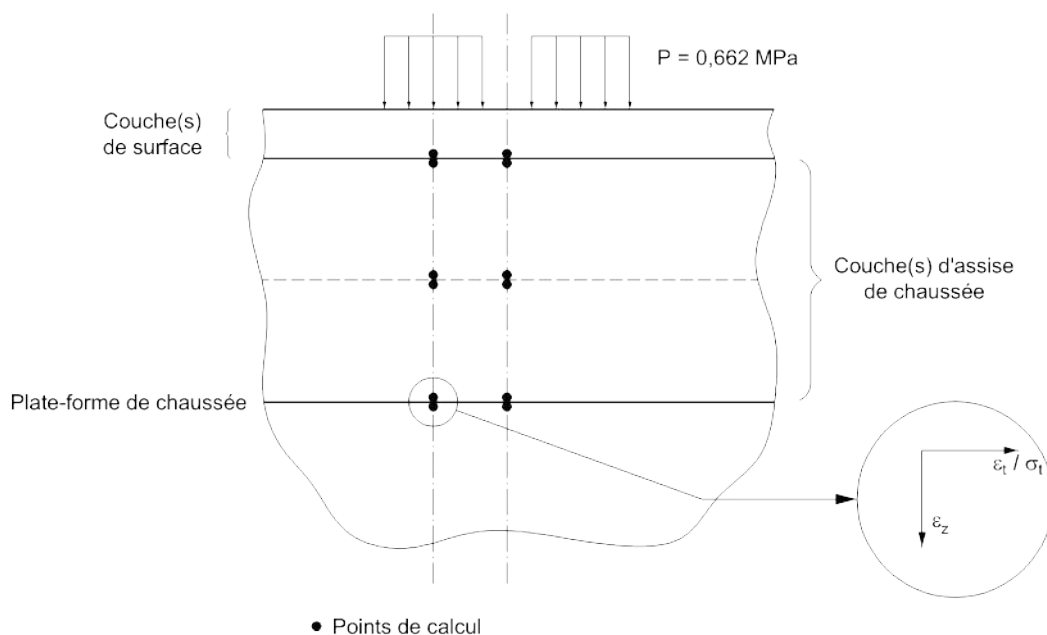


Figure 3 — Implantation des points de calcul

Le calcul peut être effectué par tout code de calcul respectant les hypothèses énoncées dans ce document, à savoir :

- une description de la structure sous forme d'un empilement de couches d'épaisseur finies, reposant sur une couche d'épaisseur infinie (ou très grande) ; l'extension horizontale des couches doit être suffisamment grande pour que les conditions aux limites n'influencent pas le calcul des sollicitations ;
- des conditions d'interface entre couches conduisant à une continuité des déplacements (collage) ou à des contraintes de cisaillement nulles (glissement) ;
- une loi de comportement élastique linéaire isotrope pour chacun des matériaux constitutifs ;
- une description des charges par une pression de contact verticale uniforme appliquée sur des surfaces circulaires ;
- l'ensemble doit permettre d'assurer par rapport au modèle théorique de Burmister une exactitude relative de un demi-centième sur le calcul des sollicitations intervenant dans le dimensionnement. À cette fin, l'outil de calcul sera vérifié par référence aux résultats de l'Annexe L.

5.4 Comparaison entre sollicitations calculées dans la structure et sollicitations admissibles

La sollicitation calculée dans chaque couche exposée à un risque de ruine, par fatigue en flexion ou par déformation permanente, doit être inférieure ou égale en valeur absolue à la sollicitation admissible.

Si tel n'est pas le cas, le calcul est répété en augmentant l'épaisseur des couches ou en modifiant la nature des matériaux de la structure de la chaussée ou de la couche de forme jusqu'à ce que tous les critères de dimensionnement soient vérifiés.

6 Vérification au gel/dégel

La vérification au gel/dégel est conseillée mais reste facultative. Le choix d'exécuter ou non cette vérification doit être fait préalablement à l'emploi de ce document. Lorsqu'elle est effectuée, elle requiert :

- le choix de l'hiver de référence, caractérisé par son indice de gel IR , contre lequel on souhaite protéger la chaussée ;
- la détermination de la quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme Q_{PF} en fonction du sol en place, de la couche de forme retenue et de la résistance mécanique de la chaussée. L'indice de gel correspondant, noté It , est égal au carré de Q_{PF} ;
- le calcul de l'indice de gel de surface admissible IS à partir de It et d'un modèle de transfert de chaleur à travers les couches supérieures de la chaussée ;
- le calcul de l'indice de gel atmosphérique admissible IA en fonction de IS ;
- la comparaison entre IA et IR .

La démarche de vérification au gel/dégel est synthétisée en Figure 4.

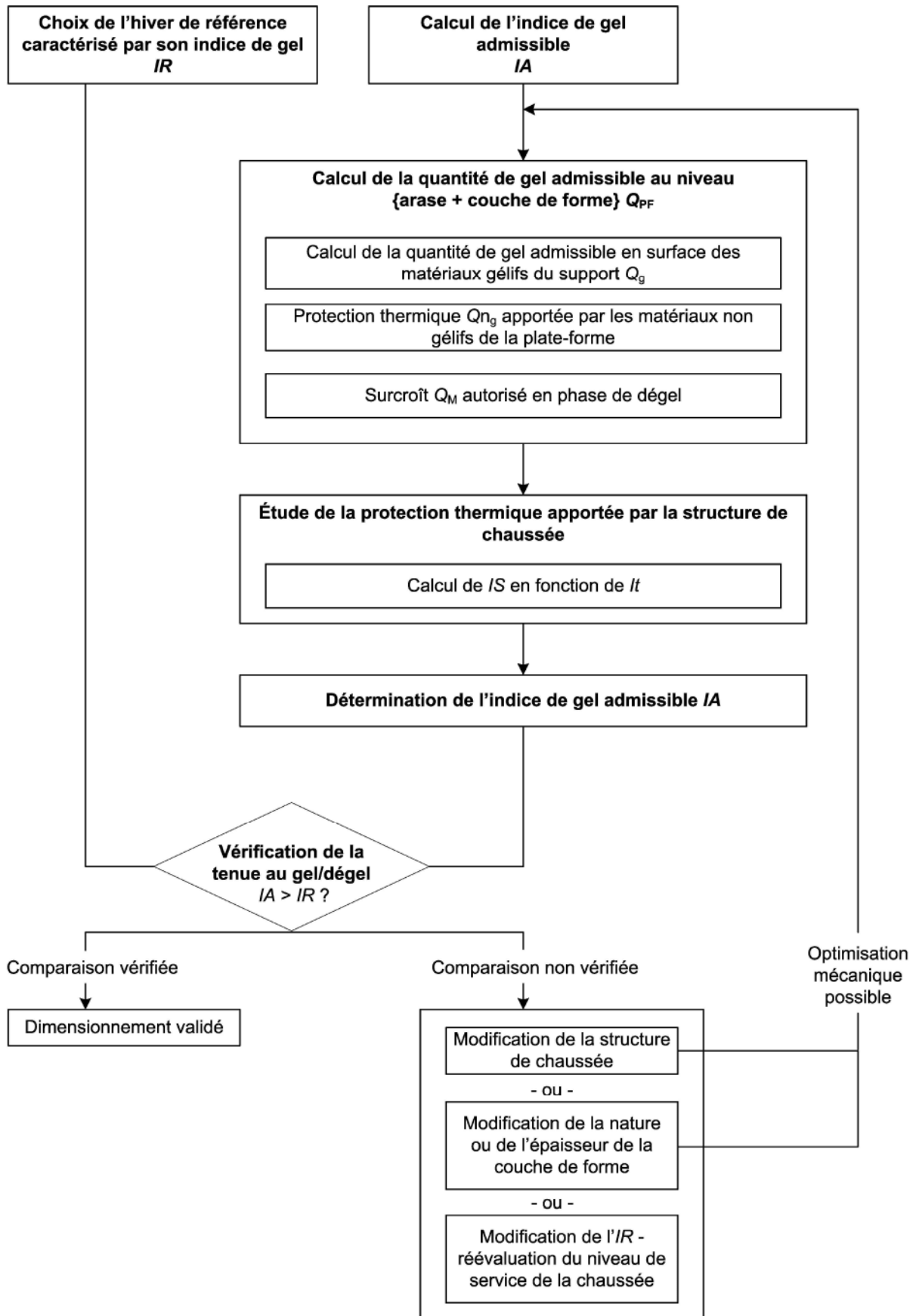


Figure 4 — Schéma de principe de la vérification au gel/dégel d'une structure de chaussée

La Figure 5 indique les grandeurs utilisées lors de la vérification au gel – dégel.

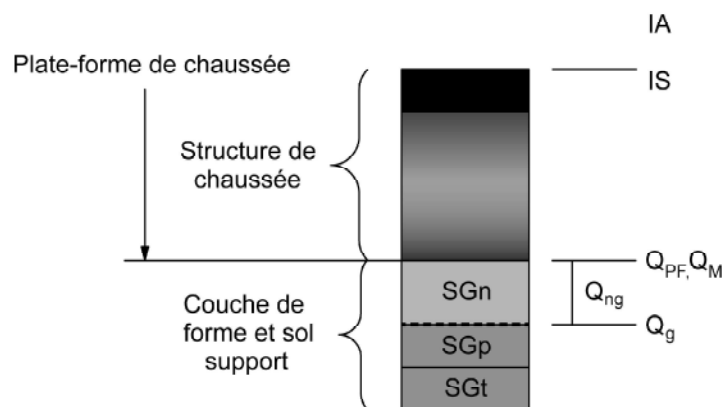


Figure 5 — Cotes de calcul des grandeurs utilisées lors de la vérification au gel – dégel

6.1 Choix de l'hiver de référence

L'hiver de référence est caractérisé par son indice de gel, noté IR , dont la méthode de calcul est décrite dans la norme NF P 98-080-1. De ce choix, dépend la fréquence de pose éventuelle des barrières de dégel.

6.2 Calcul de l'indice de gel admissible IA

La détermination de l'indice de gel admissible IA de la chaussée s'évalue en fonction de la protection thermique apportée par les couches de chaussées et la couche de forme (si elle est choisie non gélive) et de la quantité de gel admissible en surface des matériaux gélifs.

6.2.1 Sensibilité au gel du support de chaussée

6.2.1.1 Sensibilité au gel des matériaux du support de chaussée

Les matériaux utilisés en couche de forme sont, *a priori*, choisis non gélifs, sauf si la vérification au gel permet un autre choix.

Dans tous les cas, les caractéristiques minimales des matériaux utilisés en couche de forme devront respecter les critères définis par les guides SETRA-LCPC «Réalisation des remblais et des couches de forme» et «Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – application à la réalisation des remblais et des couches de forme».

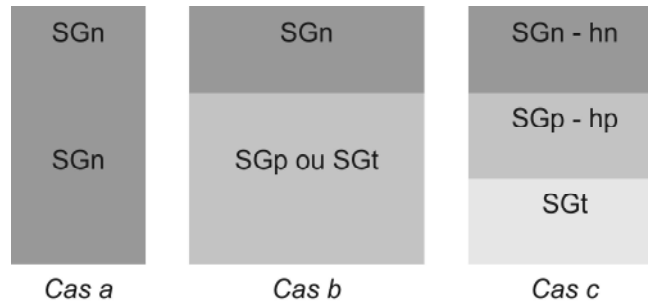
Les matériaux constitutifs de la partie supérieure des terrassements (sous la couche de forme) sont classés en trois catégories, non gélifs (SGn), peu gélifs (SGp) ou très gélifs (SGt) en fonction de la pente p de l'essai de gonflement. La méthode de classification est définie au paragraphe 7.3.3. Elle permet d'effectuer le découpage ci-après.

6.2.1.2 Découpage du support de chaussée

Le sol support et la couche de forme sont découpés en couches de même classe de sensibilité au gel. Pour les besoins de la vérification au gel-dégel, le sol support et la couche de forme sont représentés en couches de sensibilité au gel croissante avec la profondeur. Cela est obtenu :

- en assimilant à des matériaux peu gélifs (SGp) les matériaux non gélifs situés sous une couche peu gélive ;
- en assimilant à des matériaux très gélifs (SGt) les matériaux situés sous une couche très gélive.

Ceci conduit à trois configurations de plate-forme nommées a, b et c et représentées sur la Figure 6. Les grandeurs h_n et h_p sont respectivement l'épaisseur de la couche non gélive (SGn) et l'épaisseur de la couche peu gélive (SGp). Dans le cas de la configuration a, la vérification au gel/dégel s'arrête à cette étape, les matériaux étant non gélifs.



**Figure 6 — Configurations types du massif
[sol support & couche de forme]**

6.2.2 Quantité de gel Q_g admissible, au sommet des matériaux gélifs du support

Pour la configuration de type b schématisée par la Figure 6, la quantité de gel Q_g admissible en surface de la couche gélive est déterminée selon l'Équation 5.

Équation 5 : calcul de Q_g en configuration b de la Figure 6

$$Q_g = 4 \quad \text{si } 0,05 < p \leq 0,25$$

$$Q_g = \frac{1}{p} \quad \text{si } 0,25 \leq p \leq 1$$

$$Q_g = 0 \quad \text{si } 1 < p$$

où :

Q_g est la quantité de gel admissible en surface des couches gélives exprimée en $(^\circ\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$;

p est la pente de l'essai de gonflement exprimée en $\text{mm}/(^\circ\text{C}\cdot\text{heure})^{1/2}$ selon la norme NF P 98-234-2.

Pour la configuration de type c schématisée par la Figure 6, la quantité de gel Q_g admissible en surface de la couche gélive est déterminée selon l'Équation 6.

Équation 6 : calcul de Q_g

$$\text{Si } h_p < 0,2 \text{ m, } Q_g = Q_g(\text{SGt}) + \frac{h_p}{0,2} \times (Q_g(\text{SGp}) - Q_g(\text{SGt})) ;$$

$$\text{Si } h_p \geq 0,2 \text{ m, } Q_g = Q_g(\text{SGp})$$

où :

Q_g est la quantité de gel admissible en surface des couches gélives exprimée en $(^\circ\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$;

h_p est l'épaisseur de matériaux peu gélifs exprimée en mètres (m) ;

$Q_g(\text{SGp})$ est la quantité de gel admissible des matériaux peu gélifs exprimée en $(^\circ\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$;

$Q_g(\text{SGt})$ est la quantité de gel admissible des matériaux très gélifs exprimée en $(^\circ\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$.

6.2.3 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. Notée Q_{ng} , elle est calculée d'après l'Équation 7.

Équation 7 : calcul de Q_{ng}

$$Q_{ng} = A_n \times \frac{h_n^2}{(h_n + 0,1)}$$

où :

Q_{ng} est la quantité de gel correspondant à la protection thermique apportée par les couches non gélives de la plate-forme exprimée en $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$. Dans le cas où la couche de forme est constituée des matériaux qui ne sont pas non gélifs, la valeur de Q_{ng} est égale à zéro ;

h_n est l'épaisseur de matériaux non gélifs exprimée en mètres (m) ;

A_n est le coefficient dépendant de la nature du matériau de la couche de forme exprimé en $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}\cdot\text{m}^{-1}$ dont les valeurs sont fournies en Annexe D.

6.2.4 Quantité de gel Q_M complémentaire autorisée par l'analyse du comportement mécanique de la structure en période de dégel

6.2.4.1 Cas des chaussées épaisses – Épaisseur de couches liées $> 0,20$ m

La présence au dégel d'une couche dégelée de faible épaisseur est admise en partie supérieure de plate-forme. Celle-ci engendre, dans le corps de chaussée, des sollicitations plus fortes que celles observées en période normale. La quantité de gel Q_M autorisée appelée aussi quantité de gel mécanique dépend de l'épaisseur de matériaux e , supposée affectée par le dégel et pour laquelle sont prises en compte des quantités mécaniques dégradées.

Le calcul de e est effectué de manière itérative en recherchant la valeur pour laquelle la sollicitation ayant conduit au dimensionnement mécanique de la chaussée, hors période de gel/dégel, est majorée de 5 %. Pour les structures mixtes, la sollicitation majorée est la contrainte de traction à la base de la couche de fondation. L'épaisseur e est ensuite convertie en quantité de gel, notée Q_M , transmise au niveau de la plate-forme support suivant l'Équation 8.

Équation 8 : calcul de Q_M en $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$

$$Q_M = \frac{e}{0,1}$$

où :

e est l'épaisseur de la couche dégelée exprimée en mètres (m).

Le calcul de e est effectué avec les hypothèses suivantes :

- le module de la couche dégelée, d'épaisseur e située au sommet de la plate-forme est pris égal au module de la plate-forme dans les conditions hors gel/dégel, retenu lors du dimensionnement, divisé par 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.

Les autres données du problème demeurent inchangées.

6.2.4.2 Cas des chaussées peu épaisses — Épaisseur de couches liées $\leq 0,20$ m

Pour les chaussées peu épaisses dont l'épaisseur totale des couches liées est inférieure ou égale à 0,20 m, Q_M est nul.

6.2.5 Quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme Q_{PF}

La quantité de gel Q_{PF} tenue pour admissible au niveau de la plate-forme support de chaussée est calculée selon l'Équation 9.

Équation 9 : calcul de Q_{PF}

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

où :

Q_{PF} est la quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme de chaussée exprimée en $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$;

Q_n est la quantité de gel correspondant à la protection thermique des couches non gélives exprimée en $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$;

Q_g est la quantité de gel admissible en surface des couches gélives exprimée en $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$;

Q_M est la quantité de gel mécanique exprimée en $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$.

6.2.6 Protection thermique apportée par la structure de chaussée

La protection thermique apportée par la structure de chaussée se déduit de l'indice de gel It transmis à la base de la structure de chaussée en fonction de l'indice de gel IS appliqué en surface de chaussée, It étant égal à Q_{PF}^2 .

La relation entre IS et la quantité It est évaluée soit à l'aide d'un modèle de conduction thermique (modèle unidimensionnel de Fourier avec changement de phase), soit à l'aide d'une expression simplifiée dont les détails sont fournis ci-après.

Calcul numérique

L'utilisation d'un code numérique nécessite :

- la description de la géométrie multi-couches de la structure et des caractéristiques thermiques de chacune des couches (masse volumique, teneur en eau, conductivités des matériaux à l'état gelé et non gelé, capacités calorifiques massiques) ; le modèle est borné en profondeur à 40 m en dessous du sommet de la plate-forme.
- la définition des conditions initiales. Le profil initial de température retenu pour le calcul est le suivant : température de surface égale à 1 °C, variation linéaire jusqu'à 14 °C à la profondeur de 10 m en dessous du sommet de la plate-forme. À partir de - 10 m, la température est prise uniforme, égale à 14 °C ;
- la définition des conditions aux limites de la loi d'évolution dans le temps de la température en surface de chaussée : refroidissement type de la surface de chaussée de 1 °C à - 5 °C, suivant une loi hyperbolique de pente initiale égale à - 0,833 °C/h dont la représentation graphique est donnée en Figure 7. L'équation associée est définie par l'Équation 10. La température à la base du modèle est maintenue à 14 °C.
- la résolution des équations fournies en Annexe J régissant le transfert de chaleur.

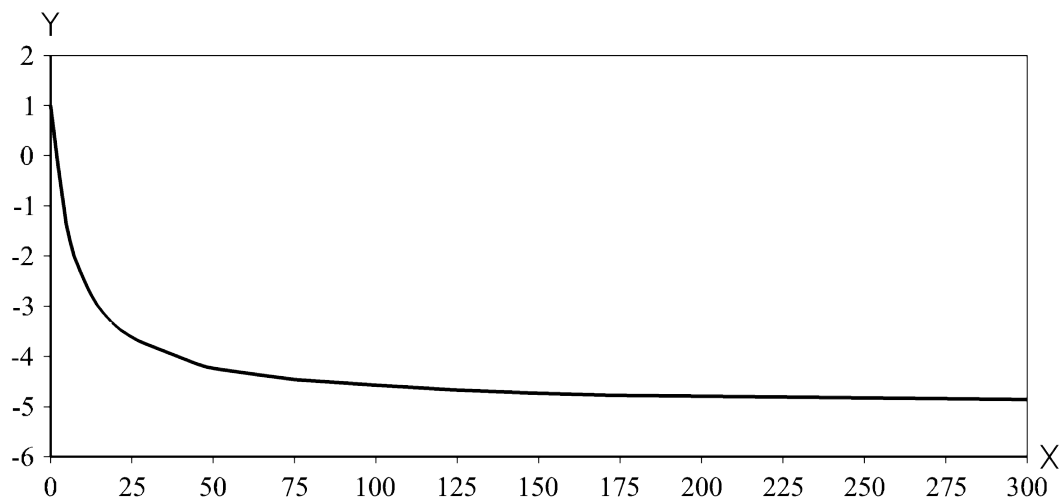
Équation 10 : loi d'évolution dans le temps de la température en surface de la chaussée

$$T_s = \frac{6 - 4,165 \times \text{temps}}{6 + 0,833 \times \text{temps}}$$

où :

T_s est la température de surface en degrés celcius (°C) ;

temps est le temps en heures.



Légende

- X Temps en heures (h)
- Y Température de surface (°C)

Figure 7 — Loi d'évolution de la température de surface pour le calcul au gel

Les caractéristiques adoptées pour les matériaux de chaussée et le sol pour le calcul de la propagation du front de gel sont fournies en Annexe G.

Méthode simplifiée

L'expression conservatrice (Équation 11) résultant de la linéarisation de la relation entre la racine carrée de IS et la racine carrée de It s'applique dans ce cas.

Équation 11 : expression de IS en fonction de It

$$\sqrt{IS} = (1 + a \times h) \times \sqrt{It} + b \times h$$

où :

- It est l'indice de gel transmis exprimé en °C.jour ;
- IS est l'indice de gel en surface de la chaussée exprimée en °C.jour ;
- a, b sont les coefficients exprimés en $(\text{°C.jour})^{1/2} \cdot \text{m}^{-1}$, dépendants de la nature du matériau, dont les valeurs sont fournies en Annexe G ;
- h est l'épaisseur de la couche en mètres (m).

Dans le cas d'une structure de chaussée constituée de plusieurs couches de matériaux différents, les valeurs a et b de l'Équation 11 s'obtiennent à partir de l'Équation 12.

Équation 12 : calcul des coefficients a et b de l'Équation 11

$$a = \left(\sum_i a_i h_i \right) / \left(\sum_i h_i \right)$$

$$b = \left(\sum_i b_i h_i \right) / \left(\sum_i h_i \right)$$

où :

- a, b sont les coefficients définis dans l'Équation 11 ;
- a_i, b_i sont les coefficients exprimés en $(\text{°C.jour})^{1/2} \cdot \text{m}^{-1}$ associés à la couche i dont les valeurs sont fournies en Annexe G ;
- h_i est l'épaisseur de la couche i en mètres (m).

6.2.7 Détermination de l'indice de gel atmosphérique admissible IA

La relation entre IS et It déterminée en 6.2.6 permet d'obtenir la valeur de l'indice de gel de surface IS associée à la valeur particulière It égale à Q_{PF}^2 .

L'indice de gel atmosphérique I_{atm} correspondant à IS se déduit de la relation approchée mise en évidence entre un indice de gel de surface et un indice de gel atmosphérique, prenant en compte les phénomènes de convection et rayonnement en surface de chaussée (Équation 13). Cette équation est valable pour la France métropolitaine.

Équation 13 : calcul de I_{atm}

$$I_{atm} = \frac{IS}{0,7} + 10$$

où :

IS est l'indice de gel en surface de la chaussée exprimée en °C.jour ;

I_{atm} est l'indice de gel atmosphérique exprimé en °C.jour.

La valeur de I_{atm} ainsi déterminée est appelée indice de gel admissible par la chaussée et notée IA .

6.3 Comparaison de l'indice de gel admissible et de l'indice de gel de référence

La vérification au gel/dégel est satisfaite si la valeur admissible IA d'indice de gel par la chaussée est supérieure ou égale à la valeur de l'indice de gel IR choisi en référence.

Dans le cas contraire, la vérification est reprise soit en changeant la nature et/ou l'épaisseur de la couche de forme, soit en changeant les matériaux de la structure, soit en diminuant la sensibilité au gel du sol support, soit en modifiant l'indice de gel de référence IR .

7 Données requises pour le dimensionnement des structures de chaussées neuves

La méthode de dimensionnement prend en considération les données suivantes :

- Les paramètres précisés en amont du projet ;
- Les propriétés de la plate-forme support de chaussée ;
- Les propriétés des matériaux de chaussée et la qualité de leur mise en œuvre.

7.1 Paramètres fixés en amont du projet

Les paramètres d'entrée, choisis en amont du projet, et nécessaires au dimensionnement mécanique de la chaussée sont les suivants :

- La durée de dimensionnement ;
- Le trafic poids lourd et son taux de croissance ;
- Le risque de calcul ;
- L'hiver de référence.

7.1.1 Durée de dimensionnement

La durée de dimensionnement (d en années) définit la durée fixée pour le calcul de l'ouvrage. Elle permet de calculer le trafic poids lourds cumulé à prendre en compte pour le dimensionnement.

Des exemples de durées d sont fournis en Annexe E.

7.1.2 Trafic poids lourds et taux de croissance

Le trafic poids lourds et son évolution font l'objet du paragraphe 7.2.

7.1.3 Risque de calcul

Le risque de calcul r (en %) associé à la durée de dimensionnement retenue d est défini en 5.2.4.1.

Des valeurs de risque de calcul usuellement utilisées sont fournies en Annexe E. Elles sont fonction du type de structure, de la nature des matériaux et de la classe de trafic.

7.1.4 Hiver et indice de gel de référence

L'hiver de référence, auquel correspond l'indice de gel de référence IR , est l'hiver contre lequel la chaussée doit être protégée. Ce peut être l'hiver le plus rigoureux connu (hiver exceptionnel noté HE présentant le plus fort indice de gel depuis 1950), l'hiver décennal (hiver rigoureux non exceptionnel noté HRNE dont la rigueur a une période de retour de 10 ans) ou tout autre hiver.

L'Annexe E précise le document de référence pour les valeurs d' IR usuelles.

7.2 Le trafic poids lourds

L'impact des véhicules légers sur la dégradation des chaussées étant négligeable seul le trafic généré par les poids lourds est pris en compte. La définition du poids lourd est précisée en 0.

7.2.1 Trafic Moyen Journalier Annuel

Le trafic Poids Lourds est exprimé en nombre de poids lourds par sens, comptés en Trafic Moyen Journalier Annuel ($TMJA$) à la date de mise en service. Le calcul se fait pour la voie de circulation la plus chargée. Des règles de calcul de $TMJA$ en fonction du nombre de voies de la chaussée sont énoncées en Annexe E.

Dans le cas où le trafic est déterminé en nombre de poids lourds sur une période plus longue (mois ou année par exemple), ce nombre est converti en $TMJA$ en le divisant par le nombre de jours correspondant à la période considérée.

Si les éléments nécessaires à l'application des règles précédentes ne sont pas disponibles, il est possible d'estimer le nombre de poids lourds à partir d'autres approches décrites dans l'Annexe D de la norme NF P 98-082.

Le Trafic Moyen Journalier Annuel ($TMJA$) permet de définir des «classes de trafic», fonction des limites définies en Annexe E, nécessaires au choix de certains paramètres (niveau de risque, coefficient d'agressivité, dispositions constructives, limites d'emploi de certains matériaux).

7.2.2 Trafic poids lourds cumulé et nombre équivalent d'essieux de référence

Pour le dimensionnement mécanique de la chaussée, il est également nécessaire de déterminer le trafic cumulé sur la période de dimensionnement.

Le dimensionnement mécanique de la chaussée est réalisé en considérant le trafic poids lourds cumulé pour la durée de dimensionnement retenue, représenté par le Nombre cumulé de Poids Lourds (N_{PL}) et calculé selon l'Équation 14.

Équation 14 : calcul de N_{PL}

$$N_{PL} = 365 \times TMJA \times C$$

où :

N_{PL} est le nombre cumulé de Poids Lourds ;

$TMJA$ est le Trafic Moyen Journalier Annuel exprimé en nombre de PL/jour/sens pour la voie la plus chargée, de l'année de mise en service ou de la période considérée ;

C est le facteur de cumul du trafic pour la durée de dimensionnement.

La valeur du *TMJA* à prendre en compte est la suivante :

- si le *TMJA* est connu précisément, cette valeur est utilisée pour le calcul du Nombre cumulé de Poids Lourds (N_{PL}) ;
- si le *TMJA* est connu sous forme de classe de trafic journalier à la mise en service, le calcul de N_{PL} est réalisé avec le *TMJA* correspondant à la moyenne géométrique de la classe de trafic considérée (Annexe E).

Le calcul du coefficient *C* dépend de l'hypothèse de croissance du trafic poids lourds. Son expression pour une période de cumul de *n* années est donnée en Équation 15 pour une croissance arithmétique et dans l'Équation 16 pour une croissance géométrique.

Équation 15 : calcul de *C* pour une croissance arithmétique

$$C = n \times \left(1 + \frac{(n-1) \times \tau}{2} \right)$$

où :

- τ est le taux de croissance arithmétique du trafic poids lourds en % ;
- n* est la période de cumul en année.

Équation 16 : calcul de *C* pour une croissance géométrique

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

où :

- τ est le taux de croissance géométrique du trafic poids lourds en % ;
- n* est la période de cumul en année.

Dans le cas le plus simple où le taux de croissance est constant sur l'ensemble de la durée de dimensionnement, la période de cumul *n* est alors égale à la durée de dimensionnement *d*.

Dans le cas contraire, le calcul du coefficient *C* est réalisé en considérant autant de périodes sur lesquelles le taux de croissance est constant. Le *TMJA* au début de chaque période est déduit de celui de la période précédente. Les différents N_{PL} calculés (avec les formules précédentes) sont ensuite sommés pour déterminer le N_{PL} global.

Pour le dimensionnement, le nombre de poids lourds cumulé sur la durée de dimensionnement (N_{PL}) est converti en un Nombre Equivalent d'essieux de référence (*NE*) à l'aide du coefficient d'agressivité moyen du trafic *CAM*, suivant l'Équation 17.

Équation 17 : calcul de *NE* en fonction de N_{PL}

$$NE = N_{PL} \times CAM$$

où :

- NE* est le nombre équivalent d'essieux de référence ;
- N_{PL} est le nombre de poids lourds calculé pour la durée de dimensionnement *d* ;
- CAM* est le coefficient d'agressivité moyen du trafic défini au paragraphe 5.1. Des valeurs indicatives sont fournies en Annexe C.

7.3 La plate-forme support de chaussée

Pour le dimensionnement des chaussées, la plate-forme support est décrite par les quatre caractéristiques suivantes :

- la portance à long terme de la plate-forme ;
- le coefficient d'hétérogénéité de la plate-forme ;
- la sensibilité au gel des matériaux constitutifs de la plate-forme ;
- la protection thermique apportée par les matériaux non gélifs de la plate-forme.

Le cas des substratums rocheux est traité spécifiquement dans le paragraphe 7.3.5.

7.3.1 La portance à long terme

Pour le dimensionnement des chaussées, cinq classes de portance à long terme de la plate-forme, notées PFi , sont définies en fonction du niveau du module de rigidité de la plate-forme. Les valeurs sont fournies en Annexe D.

Lors du calcul des sollicitations induites dans la chaussée au passage d'un essieu de référence, la plate-forme est assimilée à un demi-espace élastique et homogène auquel sont affectées :

- une valeur de module de rigidité correspondant à la borne inférieure de la classe de portance à long terme de la plate-forme (Annexe D) ;
- une valeur de coefficient de Poisson fixée forfaitairement à 0,35.

7.3.2 Hétérogénéité de la plate-forme

L'effet des éventuelles hétérogénéités locales de portance sur le dimensionnement est pris en compte à travers le coefficient d'ajustement k_s défini au paragraphe 5.2.4.2 et dont les valeurs sont fournies en Annexe D.

7.3.3 Sensibilité au gel des matériaux situés sous la plate-forme

La sensibilité au gel des matériaux situés sous la plate-forme de chaussée est un paramètre d'entrée de la vérification au gel-dégel de la chaussée explicitée dans l'Article 6. Elle est déterminée à l'issue de l'essai de gonflement au gel (NF P 98-234-2). Cet essai met en évidence la sensibilité des matériaux au phénomène de cryosuccion. La valeur de la pente mesurée lors de l'essai détermine la classe de sensibilité au gel des matériaux. Les fourchettes de valeurs définissant ces classes sont fournies en Annexe D. En l'absence de la réalisation de cet essai, des éléments complémentaires permettant d'apprécier la sensibilité au gel des matériaux sont fournis en Annexe D.

7.3.4 Protection thermique des matériaux non gélifs de la plate-forme

La protection thermique apportée par les matériaux non gélifs constitutifs de la plate-forme est un paramètre d'entrée de la vérification au gel-dégel de la chaussée explicitée dans l'Article 6. Le paramètre An permettant de calculer la quantité de gel Q_{ng} apportée par les matériaux non gélifs est fonction de la nature et de l'épaisseur des différents types de matériaux présents. Des valeurs numériques sont fournies en Annexe D.

7.3.5 Cas des substratums rocheux

La plate-forme support de chaussée est dans ce cas assimilée à un demi-espace élastique et homogène auquel est affecté un module de rigidité de 10 000 MPa et un coefficient de Poisson de 0,25.

7.4 Propriétés des matériaux de chaussée prises en compte dans le dimensionnement

Le présent document ne s'applique que dans le cas d'emploi des matériaux de chaussée normalisés, cités ci-après.

7.4.1 Les graves non traitées

Les graves non traitées sont définies dans la norme NF EN 13285. La norme distingue les GNT «A» obtenues en une seule fraction, dont l'homogénéité de la granularité est codifiée, et les GNT «B» obtenues par recombinaison de plusieurs fractions granulaires distinctes, dans des proportions définies et qui sont malaxées et humidifiées en centrale.

Lors du calcul des sollicitations induites dans la chaussée au passage d'un essieu de référence, les matériaux sont pris en compte à travers leurs caractéristiques élastiques qui sont le module de rigidité et le coefficient de Poisson.

Les valeurs de module de rigidité de la GNT à utiliser sont fournies en Annexe F.

7.4.2 Les matériaux traités aux liants hydrauliques et bétons compactés

Les matériaux traités aux liants hydrauliques et les bétons compactés sont définis dans les normes EN de la série NF EN 14227.

Sont concernés dans le cadre de ce document les matériaux normalisés suivants :

- les graves-ciment : mélange granulaire traité au ciment ;
- les graves-laitier : mélange traité au laitier B2 ;
- les graves-cendres volantes-chaux (cendre volante siliceuse) : mélange traité à la cendre volante 2 ;
- les graves-liant hydraulique routier : mélange traité au liant hydraulique routier 2 ;
- les graves-laitier-cendres volantes-chaux : mélange traité à la cendre volante 2 ;
- les graves-cendres volantes hydrauliques : mélange traité à la cendre volante 2 ;
- les bétons compactés routiers et les graves traitées aux liants hydrauliques ou pouzzolaniques à hautes performances ;
- les sables laitiers : mélange traité au laitier B3 ;
- les sables-ciment : mélanges granulaires traités au ciment ;
- les sables-liant hydraulique routier : mélange traité au liant hydraulique routier 3 ;
- les sables-laitier-cendres volantes-chaux : mélange traité à la cendre volante 3 ;
- les sables-cendres volantes hydraulique : mélange traité à la cendre volante 3 ;
- les sables-cendres volantes chaux : mélange traité à la cendre volante 3.

Ces matériaux sont pris en compte à travers des jeux de paramètres, caractérisant :

- leur comportement élastique : module de rigidité et coefficient de Poisson ;
- leur comportement en fatigue : σ_6 , b et S_N ;
- le coefficient de calage : k_c ;
- le coefficient de discontinuité : k_d .

Les valeurs de ces paramètres sont fournies en Annexe F.

7.4.3 Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés

Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés sont définis dans les normes EN de la série NF EN 13108.

Sont concernés dans le cadre de ce document les matériaux normalisés suivants :

- les graves-bitume utilisées en couche d'assise ;
- les enrobés à module élevé utilisés en couche d'assise ;
- les divers bétons bitumineux utilisés en couche de roulement ou couche de liaison.

Ces matériaux sont pris en compte à travers des jeux de paramètres caractérisant :

- leur comportement réversible, ramené au cas de loi élastique : module de rigidité et coefficient de Poisson ;
- leur comportement en fatigue : ε_6 , b et S_N ;
- le coefficient de calage : k_c .

Les paramètres de dimensionnement des matériaux traités aux liants hydrocarbonés sont fournis en Annexe F.

7.4.4 Les bétons de ciment

Les bétons de ciment sont conformes aux normes NF EN 206-1 et son annexe nationale, NF EN 13877-1 et NF P 98-170.

Les aciers utilisés dans les bétons armés sont conformes à l'Article 4 de la norme NF P 98-170.

Ces matériaux sont pris en compte à travers des jeux de paramètres, caractérisant :

- leur comportement réversible : module de rigidité et coefficient de Poisson ;
- leur comportement en fatigue : σ_6 , b et S_N ;
- le coefficient de calage : k_C
- le coefficient de discontinuité : k_d .

Les valeurs de ces paramètres sont fournies en Annexe F.

8 Application de la méthode aux différentes familles de structures de chaussée

Dans cette partie, pour chaque famille de structure, sont explicités :

- les hypothèses de modélisation retenues pour les calculs ;
- les critères retenus pour le dimensionnement.

8.1 Vérification vis-à-vis de la plate-forme, commune à l'ensemble des structures de chaussée

Le critère indiqué ci-après est commun aux différentes familles de structures.

Il doit être vérifié que les déformations permanentes de la plate-forme restent acceptables sur la durée de vie de l'ouvrage. Cette vérification est basée sur la valeur de la déformation verticale réversible maximale ε_z calculée au sommet de la plate-forme, à partir du modèle multi-couches de Burmister.

La valeur de ε_z doit être inférieure à la valeur admissible, définie par l'Équation 18 ou l'Équation 19 en fonction de NE .

Pour NE supérieur à 250 000 :

Équation 18 : calcul de $\varepsilon_{z,adm}$ pour NE supérieur à 250 000

$$\varepsilon_{z,adm} = 0,012 \times (NE)^{-0,222}$$

Pour NE inférieur ou égal à 250 000 :

Équation 19 : calcul de $\varepsilon_{z,adm}$ pour NE inférieur ou égal à 250 000

$$\varepsilon_{z,adm} = 0,016 \times (NE)^{-0,222}$$

8.2 Vérification vis-à-vis des couches de graves non traitées en assise

Le critère indiqué ci-après est commun aux différentes familles de structures.

Dans le cas d'un trafic NE inférieur ou égal à 250 000, il n'est pas introduit de critère de calcul sur le matériau d'assise. La tenue de la Grave Non Traitée (GNT) vis-à-vis des risques de déformation permanente est assurée empiriquement par le choix des caractéristiques des matériaux.

Dans les autres cas (NE supérieur ou égal à 250 000), la vérification vis-à-vis de l'orniérage à grand rayon porte sur la déformation verticale réversible maximale ε_z calculée en sommet de la couche granulaire non traitée, à partir du modèle multi-couches de Burmister.

La valeur de ε_z doit être inférieure à la valeur admissible, définie par l'Équation 20 en fonction de NE .

Équation 20 : calcul de $\varepsilon_{z,adm}$ pour les couches de GNT en assise

$$\varepsilon_{z,adm} = 0,012 \times (NE)^{-0,222}$$

8.3 Les chaussées souples

8.3.1 Modélisation de la structure de chaussée

La structure est représentée par un massif multi-couches élastique, les couches étant collées entre elles.

L'épaisseur et la nature de la couche de surface sont choisies en fonction du trafic (Annexe B).

L'épaisseur de couche de base est fixée à 0,15 m si NE est inférieur ou égal à 100 000 et à 0,20 m si NE est supérieur à 100 000.

Le dimensionnement porte sur la seule couche de fondation. Celle-ci est subdivisée en sous-couches de 0,25 m d'épaisseur maximale à partir de la plate-forme. Un module de rigidité est affecté à chaque sous-couche, croissant de la plate-forme vers la couche de base.

Les modules de rigidité des matériaux, la règle de progression des modules des sous-couches de la couche de fondation et les coefficients de Poisson à prendre en compte sont fournis en Annexe F.

8.3.2 Critère de dimensionnement

Ces chaussées sont vérifiées par le calcul vis-à-vis du seul critère de déformation permanente de la plate-forme (Équation 19).

8.4 Les chaussées bitumineuses épaisses

8.4.1 Modélisation de la structure de chaussée

La structure est représentée par un massif multi-couches élastique, les couches étant collées entre elles, tout comme la couche de fondation sur la couche support de la plate-forme. Les règles de détermination des modules de rigidité des matériaux et les coefficients de Poisson à prendre en compte sont fournis en Annexe F.

L'épaisseur et la nature de la couche de roulement et éventuellement de la couche de liaison sont choisies au préalable (Annexe B).

Le dimensionnement porte sur les épaisseurs des couches d'assise.

Pour les assises à couche de base en matériaux bitumineux et à fondation en grave non traitée de catégorie B de la norme NF EN 13285, les épaisseurs minimales en couche de fondation sont de 0,15 m sur PF3, 0,25 m sur PF2 et 0,45 m sur PF1. Le dimensionnement ne porte que sur l'épaisseur de la couche de base en matériau bitumineux (le critère sur la plate-forme s'avérant en général automatiquement vérifié).

Pour les assises en matériaux bitumineux, l'épaisseur de la couche de fondation est au moins égale à l'épaisseur de la couche de base augmentée de 0,01 m.

8.4.2 Critères de dimensionnement

Ces chaussées sont vérifiées par le calcul, vis-à-vis de :

- la rupture par fatigue à la base des couches bitumineuses : l'allongement ε_t à la base des couches bitumineuses doit rester inférieur à la valeur admissible $\varepsilon_{t,adm}$ calculée selon l'Équation 1 ;
- la déformation permanente des couches non liées et de la plate-forme : la déformation verticale réversible ε_z à la surface des couches non liées et de la plate-forme support doit rester inférieure à la valeur limite $\varepsilon_{z,adm}$ (Équation 18 ou Équation 19 et Équation 20).

8.5 Les chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques

8.5.1 Modélisation de la structure de chaussée

La chaussée est représentée par un massif multi-couches élastique. Les modules de rigidité des matériaux et les coefficients de Poisson sont fournis en Annexe F, Article F.2.

L'épaisseur et la nature de la couche de roulement et éventuellement de la couche de liaison sont choisies au préalable (Annexe B).

Le dimensionnement porte sur les épaisseurs des couches d'assise.

Le cas des structures comportant deux couches d'assise est traité indépendamment de celui des structures ayant une seule couche d'assise en matériau traité aux liants hydrauliques.

8.5.1.1 Cas des structures comportant deux couches d'assise

Le dimensionnement est effectué en retenant pour la couche de fondation une épaisseur minimale modulée selon le niveau de plate-forme : 0,20 m en PF2, 0,18 m en PF3 et 0,15 m en PF4.

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 augmentée de 0,05 m, excepté pour les chaussées à couche de fondation en sable hydraulique de classe 2 pour lesquelles l'épaisseur de la couche de base est prise au moins égale à celle de la couche de fondation augmentée de 0,10 m.

8.5.1.2 Cas des structures comportant une seule couche d'assise en matériau traité aux liants hydrauliques

Une valeur d'épaisseur minimale de 0,25 m est imposée pour des matériaux de classe mécanique supérieure ou égale à T2 (NF EN 14227) pour un trafic cumulé $NE \geq 10^6$. Dans le cas où $NE < 10^6$, cette épaisseur minimale est de 0,15 m.

Le dimensionnement est effectué en retenant pour la couche de fondation une épaisseur minimale modulée selon le niveau de plate-forme : 0,20 m en PF2, 0,18 m en PF3 et 0,15 m en PF4

8.5.1.3 Conditions de liaison

À l'interface couche de fondation – plate-forme support et à l'interface couche de surface — couche de base, les deux couches sont supposées collées entre-elles.

À l'interface couche de base — couche de fondation, la condition à retenir dépend de la nature du liant hydraulique :

- avec une grave — cendres volantes — chaux ou une grave ciment de classe 4, les couches sont supposées glissantes ;
- avec une grave-laitier granulé, les couches sont collées ;
- avec les autres liants, la nature de la liaison est fortement dépendante des conditions d'exécution. La confrontation entre résultats de calcul et observation du comportement de ces structures montre cependant que l'hypothèse de glissement est trop pessimiste. L'expression des contraintes en base de couche est donc prise égale à la demi-somme des valeurs obtenues avec les cas collé et glissant (cas semi-collé). C'est le cas notamment des structures avec couche de base en grave traitée au liant hydraulique sur couche de fondation en sable traité au liant hydraulique.

À l'interface fondation-support, les couches sont supposées collées sauf en cas de couche de cure à l'émulsion de bitume non gravillonnée où les couches sont considérées glissantes.

8.5.2 Critères de dimensionnement

Les chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques sont vérifiées par le calcul, vis-à-vis de :

- la rupture par fatigue à la base des couches liées : la contrainte de traction σ_t à la base des couches traitées aux liants hydrauliques, calculée par le modèle de Burmister, doit rester inférieure à la valeur admissible $\sigma_{t,adm}$ calculée selon l'Équation 2. S'il n'y a qu'une couche ou si les couches restent collées, le niveau à considérer est la base de l'assise traitée. Sinon le critère est vérifié à la base de chaque couche traitée ;
- la déformation permanente des couches non liées et de la plate-forme : la déformation verticale réversible ε_z à la surface des couches non liées et de la plate-forme support, calculée par le modèle de Burmister, doit rester inférieure à la valeur limite $\varepsilon_{z,adm}$ (Équation 18 ou Équation 19 et Équation 20).

Dans le cas où l'interface couche de base/couche de fondation est glissante ou semi-collée, k_s ne s'applique qu'au calcul de la contrainte admissible à la base de la couche de fondation, k_s étant égal à 1 pour la couche de base.

8.6 Les chaussées à structure mixte

8.6.1 Modélisation de la structure de chaussée

La structure est représentée par un massif multi-couches élastique. Les modules de rigidité des matériaux et les coefficients de Poisson sont fournis en Annexe F. La couche de base est supposée collée sur la plate-forme support de chaussée.

L'épaisseur et la nature de la couche de roulement et éventuellement de la couche de liaison sont choisies au préalable (Annexe B). Le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée est compris entre 0,4 et 0,5 ; cette condition doit être respectée au cours des calculs successifs.

Le dimensionnement est réalisé en deux phases, suivant la méthode de calcul explicitée en 8.6.2.

- 1) dans une première phase, toutes les couches sont considérées collées jusqu'à endommagement total de la couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques.
- 2) dans une seconde phase, la couche de matériaux traités aux liants hydrauliques est supposée endommagée par fatigue. Son module résiduel est alors pris égal à 1/5^{ème} du module initial et l'interface matériaux bitumineux — matériaux hydrauliques est alors considérée comme glissante. C'est alors la couche de base en matériau bitumineux qui reprend les efforts en traction par flexion.

Le dimensionnement porte sur les épaisseurs des couches d'assise.

8.6.2 Critères de dimensionnement

Les chaussées à structure mixte sont vérifiées par le calcul, vis-à-vis :

- de la rupture par fatigue à la base de la couche traitée aux liants hydrauliques en phase 1 : la contrainte de traction σ_t à la base des couches traitées aux liants hydrauliques, calculée par le modèle de Burmister, doit alors rester inférieure à la valeur admissible calculée selon l'Équation 2 ;
- de la rupture par fatigue à la base de la couche bitumineuse en phase 2 : l'allongement ε_t à la base des couches bitumineuses, calculée par le modèle de Burmister, doit rester inférieur à la valeur admissible calculée selon l'Équation 1 ;
- de la déformation permanente des couches non liées et de la plate-forme : la déformation verticale réversible ε_z à la surface des couches non liées et de la plate-forme support, calculée par le modèle de Burmister, doit rester inférieure à la valeur limite $\varepsilon_{z,adm}$ (Équation 18 ou Équation 19 et Équation 20).

Pour la couche traitée aux liants hydrauliques, NE est calculé avec un coefficient CAM identique à celui pris pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques (Annexe C).

Pour la couche bitumineuse, NE est calculé avec un coefficient CAM identique à celui pris pour les chaussées bitumineuses (Annexe C).

Les étapes du calcul de dimensionnement sont les suivantes :

- en première phase, calcul de la contrainte σ_t à la base de la couche de fondation. Le nombre de passages équivalents de l'essieu de référence est déduit de l'Équation 2, puis le nombre de poids lourds cumulé correspondant N_{PL1} est calculé en appliquant l'Équation 17 ;
- en seconde phase, calcul de la déformation ε_t à la base de la couche de base. Le nombre de passages équivalents de l'essieu de référence est déduit de l'Équation 1, puis le nombre de poids lourds cumulé correspondant N_{PL2} est calculé en appliquant l'Équation 17 ;
- enfin, calcul du nombre total de poids lourds $N_{PL1} + N_{PL2}$ conduisant à la ruine de la chaussée. La structure convient si $N_{PL1} + N_{PL2} > N_{PL}$, nombre de poids lourds correspondant à la durée de dimensionnement de la chaussée.

8.7 Les chaussées à structure inverse

8.7.1 Modélisation de la structure de chaussée

La structure est représentée par un massif multi-couches élastique, les couches étant collées entre elles. L'interface couche de base — plate-forme est collée.

Les modules de rigidité des matériaux et les coefficients de Poisson à prendre en compte sont fournis en Annexe F. À défaut de valeurs données par une étude spécifique, le module de rigidité de la couche de grave naturelle non traitée est pris égal à 480 MPa.

L'épaisseur et la nature de la couche de roulement et éventuellement de la couche de liaison sont choisies au préalable (Annexe B). L'épaisseur de la couche granulaire intercalaire est prise égale à 0,12 m.

Le dimensionnement porte sur les épaisseurs des seules couches d'assise en matériaux bitumineux et matériaux traités aux liants hydrauliques.

8.7.2 Critères de 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 : l'allongement ε_t à la base des couches bitumineuses, calculé par le modèle de Burmister, doit rester inférieur à la valeur admissible $\varepsilon_{t,adm}$ calculée selon l'Équation 1 ;
- de la rupture par fatigue des couches traitées aux liants hydrauliques : la contrainte de traction σ_t à la base des couches traitées aux liants hydrauliques, calculée par le modèle de Burmister, doit alors rester inférieure à la valeur admissible $\sigma_{t,adm}$ calculée selon l'Équation 2 ;
- de la déformation permanente du support : la déformation verticale ε_z à la surface de la plate-forme support, calculée par le modèle de Burmister, doit rester inférieure à la valeur admissible $\varepsilon_{z,adm}$ (Équation 18 ou Équation 19) ;
- de l'orniérage de la couche de grave non traitée : la déformation verticale ε_z à la surface de la GNT, calculée par le modèle de Burmister, doit rester inférieure à la valeur admissible $\varepsilon_{z,adm}$ qui tient compte d'une majoration de 20 % des valeurs données par l'équation 18 et l'équation 19, étant donnée la faible épaisseur de cette couche intermédiaire et de sa qualité.

Étant donné 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 admissible $\varepsilon_{z,GNT}$ supérieure de 20 % à celle retenue pour les autres structures.

Pour $NE > 250\ 000$, la déformation verticale limite à la surface de la GNT pour les structures inverses est alors donnée par l'Équation 21.

Équation 21 : calcul de $\varepsilon_{z,adm}$ pour la GNT dans les structures inverses pour $NE > 250\ 000$

$$\varepsilon_{z,adm} = 0,0144 \times (NE)^{-0,222}$$

Pour $NE \leq 250\ 000$, la déformation verticale limite à la surface de la GNT pour les structures inverses est donnée par l'Équation 22.

Équation 22 : calcul de $\varepsilon_{z,adm}$ pour la GNT dans les structures inverses pour $NE \leq 250\ 000$

$$\varepsilon_{z,adm} = 0,0192 \times (NE)^{-0,222}$$

8.8 Les chaussées en béton de ciment

Les structures retenues dans le cadre du présent document sont les suivantes :

- dalles sur couche de forme (avec ou sans goujons) pour des trafics inférieurs ou égaux à T3 ;
- dalles non goujonnées ou goujonnées ou BAC sur fondation en béton maigre ou grave hydraulique ;
- BAC sur fondation en grave bitume de classe 3 ;
- BCg sur fondation en grave bitume de classe 3 pour des trafics inférieurs ou égaux à T1 ;
- BAC sur béton bitumineux ;
- dalles sur couche drainante en grave non traitée. Cette structure est traitée spécifiquement en 8.8.4, son dimensionnement étant empirique.

8.8.1 Modélisation de la structure de chaussée

La structure est représentée par un massif multi-couches élastique continu. Les discontinuités transversales et les effets des gradients thermiques sont pris en compte par le coefficient k_d défini à l'Article 5 dont les valeurs sont fournies en F.4.

Les conditions de liaison entre couches sont les suivantes :

- interface entre l'éventuelle couche de roulement en enrobé ou en Enduit Superficiel d'Usure (ESU) et son support : collée ;
- interface dalles sur couche de forme collée si la couche de forme est non traitée, glissante sinon ;
- interface entre dalles ou BAC et fondation en béton maigre ou grave hydraulique : glissante ;
- interface BAC sur fondation en grave bitume : collée pendant 15 ans puis glissante ;
- interface BCg sur fondation en grave bitume : semi-collée ;
- interface BAC sur béton bitumineux : glissante ;
- interface couche de fondation — plate-forme support : collée.

Les modules de rigidité des matériaux et les coefficients de Poisson sont fournis en F.4.

Le dimensionnement porte sur les épaisseurs des couches de base – roulement et de fondation.

Pour les chaussées à fondation en béton maigre, la couche de fondation a une épaisseur minimale de 0,18 m en PF2, 0,15 m en PF3 et 0,12 m en PF4. Pour les chaussées à fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques, la couche de fondation a une épaisseur minimale de 0,20 m en PF2, 0,18 m en PF3 et 0,15 m en PF4.

Les structures BAC sur fondation en grave bitume de classe 3 ne peuvent être mises en œuvre que sur des plates-formes PF3 ou PF4. L'épaisseur de matériaux bitumineux minimale est alors fixée à 0,08 m.

Les structures BCg sur fondation en grave bitume de classe 3 ne peuvent être mises en œuvre que sur des plates-formes de performance au moins égale à PF2^{qs}. L'épaisseur de matériaux bitumineux minimale est alors fixée à 0,08 m.

Les structures BAC sur BBSG ne peuvent être mises en œuvre que sur plate-forme traitée PF3 ou PF4. L'épaisseur minimale du BBSG est fixée à 0,05 m.

8.8.2 Critères de dimensionnement

Pour les fondations en béton maigre et grave hydraulique :

Les chaussées en béton de ciment sont vérifiées par le calcul, vis-à-vis de la rupture par fatigue à la base de la couche base-roulement et à la base de la couche de fondation : la contrainte de traction σ_t à la base des couches en béton de ciment ou en grave hydraulique, calculée par le modèle de Burmister, doit alors rester inférieure à la valeur admissible calculée selon l'Équation 2.

Dans le cas où l'interface couche de base / couche de fondation est glissante ou semi-collée, le coefficient k_s ne s'applique qu'au calcul de la contrainte admissible à la base de la couche de fondation, k_s étant égal à 1 pour la couche de base.

Pour les fondations bitumineuses :

Le dimensionnement de la structure BAC sur grave bitume de classe 3 est réalisé en deux phases successives : pendant les 15 premières années, le BAC est considéré collé sur la couche de grave bitume de classe 3 ; le BAC est ensuite considéré glissant sur son support pendant le reste de la durée de vie retenue.

Pour chacune des deux phases de fonctionnement, la sollicitation à la base de la couche de fondation en grave bitume de classe 3 (déformation) et celle à la base du BAC (contrainte) sont calculées par le modèle de Burmister. Pour chacune des couches (fondation et base), le nombre de passages équivalents de l'essieu de référence est alors déterminé pour chacune des phases de calcul à partir des sollicitations calculées, par inversion de la loi de fatigue propre à chaque matériau (Équation 1 et Équation 2) et converti en nombre de poids lourds (Équation 17). La somme de ces nombres de passage issus des deux phases de calcul conduit au nombre total de passages de poids lourds admissibles par chacune des deux couches (base et fondation) pour la structure considérée.

Le calcul est conduit par itération sur l'épaisseur de BAC jusqu'à ce que le nombre total de poids lourds admissibles soit supérieur ou égal, pour chacune des deux couches (base et fondation), au nombre de poids lourds correspondant aux hypothèses retenues (trafic journalier, durée de calcul et taux de croissance).

Dans tous les cas, il convient de vérifier que la durée de vie de la phase 1, est au moins supérieure ou égale à 15 ans.

8.8.3 Dimensionnement des aciers

Le dimensionnement des aciers se déduit des épaisseurs de dalles béton trouvées lors du dimensionnement de la structure.

L'Annexe C de la norme NF P 98-170 précise les conditions d'emploi des aciers, fers de liaison, armatures des chaussées BAC et la détermination du nombre et des caractéristiques des goujons. Les goujons sont conformes à la norme NF EN 13877-3.

8.8.4 Cas de la structure dalle sur couche drainante

Le dimensionnement de cette structure est empirique. La couche de base-roulement est constituée d'un béton de ciment de classe 5 non armé et non goujonné (BC5). La couche de fondation est une couche drainante (CD), constituée de matériaux de type 10/20 ou 20/30, de 0,10 m d'épaisseur.

Les structures présentées dans le Tableau 1 sont définies dans le Catalogue des structures de chaussées neuves, LCPC-SETRA (1998) en fonction de la classe de la plate-forme et en fonction du trafic.

Tableau 1 — Épaisseurs empiriques de la structure dalle sur couche drainante en fonction du nombre de poids lourds cumulé

	PF2	PF3	PF4
$6.10^6 \text{ PL} \leq N_{\text{PL}} \leq 14.10^6 \text{ PL}$	0,37 m — BC5	0,35 m — BC5	0,33 m — BC5
$2,5.10^6 \text{ PL} \leq N_{\text{PL}} < 6.10^6 \text{ PL}$	0,36 m — BC5	0,33 m — BC5	0,31 m — BC5
$1,5.10^6 \text{ PL} \leq N_{\text{PL}} < 2,5.10^6 \text{ PL}$	0,34 m — BC5	0,31 m — BC5	0,30 m — BC5
$0,5.10^6 \text{ PL} \leq N_{\text{PL}} < 1,5.10^6 \text{ PL}$	0,29 m — BC5	0,27 m — BC5	0,25 m — BC5
$N_{\text{PL}} < 0,5.10^6 \text{ PL}$	0,28 m — BC5	0,26 m — BC5	0,24 m — BC5

Annexe A

(informative)

Définitions

A.1 Structures de chaussées routières

A.1.1

chaussée

structure composée d'une ou plusieurs couches destinée à faciliter le passage de la circulation sur le terrain

A.1.2

couche élémentaire

élément de chaussée mis en œuvre en une seule opération

A.1.3

couche

élément structurel d'une chaussée, composé d'un seul produit normalisé. Une couche peut être répandue en une ou plusieurs couches élémentaires

A.1.4

couche de surface

couche de la chaussée en contact avec la circulation. La couche de surface peut être mise en œuvre en une ou plusieurs couches appelées couche de roulement et couche de liaison

A.1.5

couche de roulement

couche supérieure de la chaussée en contact avec la circulation

A.1.6

couche de liaison

couche de chaussée entre la couche de roulement et l'assise

A.1.7

assise de chaussée

élément structurel principal d'une chaussée. L'assise peut être mise en œuvre en une ou plusieurs couches appelées couche de base, couche de fondation

A.1.8

couche de base-roulement

couche de chaussée où la couche de base et la couche de roulement sont confondues

A.2 Paramètres utilisés pour le dimensionnement des chaussées

La terminologie relative à la caractérisation du trafic est définie dans les normes NF P 98-080-1 et NF P 98-082.

A.2.1 Trafic

A.2.1.1

essieu de référence

essieu simple à roues jumelées de charge P_0 égale à 130 kN

A.2.1.2**charge de référence**

la charge de référence utilisée pour le dimensionnement est représentée par l'un des jumelages de l'essieu de référence. Il est décrit à l'aide de deux disques de 0,125 m de rayon, d'entre-axe 0,375 m et exerçant en surface de chaussée une pression uniformément répartie de 0,662 MPa ; les effets de l'autre demi-essieu sur les points situés à l'aplomb de ce jumelage sont négligés

A.2.1.3**poids lourd**

véhicule dont le poids total autorisé en charge (PTAC) est supérieur à 35 kN, tel que défini dans la norme NF P 98-082

A.2.1.4**trafic**

nombre de passages de véhicules dans une période déterminée (pour une voie de circulation ou l'ensemble de la route, suivant la largeur de la voie, comme défini dans l'Article 5). Pour le dimensionnement, seul le trafic poids lourd est pris en compte

A.2.1.5**trafic poids lourd journalier moyen**

ensemble du trafic poids lourds compté, moyenné sur la période de comptage exprimé en trafic moyen journalier annuel (*TMJA*), pour la voie la plus chargée

A.2.1.6**classe de trafic**

déterminée à partir du trafic journalier moyen (*TMJA*), notée *T_i*

A.2.1.7**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 le passage d'un essieu de charge *P*, par rapport au dommage dû au passage d'un essieu standard de référence de charge *P₀*

A.2.1.8**agressivité d'un poids lourd**

l'agressivité d'un poids lourd est égale à la somme des agressivités de ses essieux

A.2.1.9**agressivité d'un trafic**

c'est la somme arithmétique des agressivités de l'ensemble des véhicules d'un trafic donné

A.2.1.10**coefficient d'agressivité moyen CAM**

le coefficient d'agressivité moyen d'un trafic donné est l'agressivité du trafic poids lourds considéré, divisé par le nombre de poids lourds constituant ce trafic

A.2.1.11**trafic cumulé équivalent NE**

nombre de passages d'essieux de référence correspondant au trafic poids lourds cumulé sur la durée de dimensionnement retenue, sur la voie la plus chargée

A.2.2**durée de dimensionnement**

durée de *d* années choisie pour le calcul de dimensionnement de la structure de chaussée

A.2.3**risque**

probabilité *r* (%) pour qu'apparaissent au cours de la durée de dimensionnement des désordres qui impliqueraient des travaux de renforcement assimilables à une reconstruction de la chaussée, en l'absence de toute intervention d'entretien structurel

A.2.4 Concepts utilisés pour le dimensionnement des chaussées

A.2.4.1

loi de fatigue

relation établie à partir d'essais cycliques en laboratoire, qui définit le nombre de cycles conduisant à la «rupture» de l'échantillon, en fonction de l'amplitude de sollicitation appliquée. La méthode de dimensionnement recourt au même formalisme de loi de dommage, décrit à partir de la courbe de Wöhler et du principe de Miner, qu'il s'agisse de fatigue et préfissuration des matériaux bitumineux ou de déformations permanentes dans les matériaux granulaires non liés. Seule change la nature des sollicitations (contrainte ou déformation réversible) pilotant les phénomènes et les valeurs numériques des paramètres de ces lois

A.2.4.2

courbe de Wöhler

courbe représentant la durée de vie en fatigue N d'une éprouvette en fonction de l'amplitude de la sollicitation appliquée s . Cette courbe est habituellement caractérisée par l'une des équations A.1 ou A.2

$$N = \left(\frac{s}{A} \right)^{\frac{1}{b}} \Leftrightarrow s = AN^b \quad \dots \text{(A.1)}$$

$$N = 10^{\frac{\alpha-s}{\beta}} \Leftrightarrow s = \alpha - \beta \log_{10} N \quad \dots \text{(A.2)}$$

où :

N est le nombre de cycles de chargement à rupture ;

s est l'amplitude des sollicitations ;

b, α, β sont les paramètres vérifiant les conditions suivantes : $-1 < b < 0$; $\alpha > 0$ et $\beta > 0$.

En introduisant l'amplitude de sollicitation conventionnelle s_6 correspondant à une rupture à 1 million de cycles, la courbe de Wöhler s'écrit encore :

$$N = 10^6 \left(\frac{s}{s_6} \right)^{\frac{1}{b}} \Leftrightarrow s = s_6 \left(\frac{N}{10^6} \right)^b \quad \dots \text{(A.3)}$$

A.2.4.3

principe de Miner

loi de cumul des dommages en fatigue correspondant à des niveaux de sollicitation différents

Le dommage élémentaire d_i s'exprime par l'équation A.4.

$$d_i = \frac{1}{N_i} \quad \dots \text{(A.4)}$$

où :

N_i est la durée de vie correspondant au niveau de chargement s_i .

Le principe de Miner considère que la somme des dommages élémentaires d'un matériau soumis à des niveaux de sollicitation différents est égale à 1 à la rupture, quel que soit l'ordre d'application de ces sollicitations.

$$\sum_{i=1}^n n_i \times d_i = 1 \quad \dots \text{(A.5)}$$

où :

d_i est le dommage élémentaire au niveau de chargement s_i ;

n_i est le nombre de cycles de chargement d'amplitude de sollicitation s_i appliqués.

A.2.4.4

valeur admissible de contrainte ou déformation dans une couche de chaussée

valeur de contrainte ou déformation dans une couche de chaussée qui ne doit pas être dépassée, pour s'assurer que la probabilité de dépassement de la sollicitation admissible de dimensionnement en un point donné de la couche reste inférieure ou égale au risque r

Annexe B

(normative)

Choix de la couche de surface

B.1 Couche de roulement en enrobé

La couche de surface bitumineuse est fonction de la structure et du trafic. Différentes techniques sont utilisables en fonction des caractéristiques de revêtement recherchées (bruit, adhérence, protection des couches d'assise, confort des usagers). Le Tableau B.1 définit les épaisseurs utilisables pour les différentes techniques.

**Tableau B.1 — Domaine d'épaisseur
des différentes techniques de couche de roulement**

Techniques	Normes	Granularité	Épaisseur (m)
BB semi-grenus BBSG	NF EN 13108-1	EB10 EB14	0,05 à 0,07 0,06 à 0,09
BB minces BBM	NF EN 13108-1	EB10 EB14	0,03 à 0,04 0,035 à 0,05
BB drainants BBDr	NF EN 13108-7	BBDr6 BBDr10	0,03 à 0,04 0,04 à 0,05
BBS (Bétons bitumineux pour chaussées où $NE \leq 250\ 000$)	NF EN 13108-1	EB10 – type 1 EB10 – type 2 EB10 – type 3 EB10 – type 4	0,04 à 0,05 0,04 à 0,05 0,08 0,10 à 0,12
BB très minces BBTM	NF EN 13108-2	BBTM10 BBTM6	0,02 à 0,03 0,02 à 0,03
BB Ultra-minces BBUM	prNF EN 13108-9 (mai 2010)	UTLAC10 UTLAC6	0,015 0,015
BB à module élevé BBME	NF EN 13108-1	EB10 EB14	0,05 à 0,07 0,06 à 0,09
Enduits superficiels ES	NF EN 12271		
Asphalte coulé routier	NF EN 13108-6		

B.1.1 Chaussées où $NE \leq 250\ 000$ en rase campagne ou milieu péri-urbain

Pour les chaussées souples et semi-rigides pour lesquelles $NE \leq 100\ 000$, la couche de roulement peut être réduite à un Enduit Superficiel d'Usure (ESU).

Pour les chaussées souples pour lesquelles $NE \leq 250\ 000$, la Figure B.1 donne l'épaisseur de la couche de surface en fonction du trafic cumulé (courbe issue des retours d'expérience).

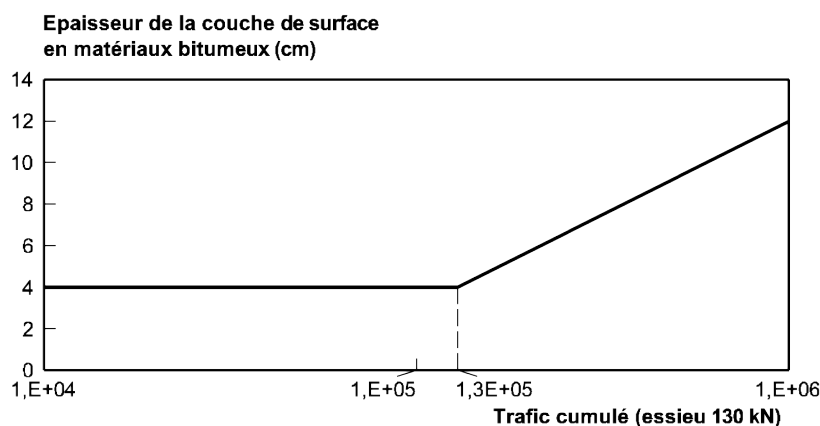


Figure B.1 — Épaisseur de la couche de surface en matériaux bitumeux pour les chaussées à faible trafic, à assise granulaire

B.1.2 Chaussées où $NE > 250\ 000$ en rase campagne ou milieu péri-urbain

B.1.2.1 Structures bitumineuses épaisses, mixtes et inverses

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.

En ce qui concerne la couche de liaison, des épaisseurs de l'ordre de 0,05 m à 0,07 m sont préconisées. Si la couche de roulement est mince ou très mince, cette plage d'épaisseur peut être étendue jusqu'à 0,09 m.

B.1.2.2 Structures semi-rigides

Pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, l'observation du comportement de chaussées réelles conduit à adopter les valeurs d'épaisseur minimales mentionnées dans le Tableau B.2.

Tableau B.2 — Épaisseurs minimales de la couche de surface pour chaussées semi-rigides

Classe de trafic	Épaisseur minimale de la couche de surface (m)
$T \leq T2$	0,06
$T = T1$	0,08
$T \geq T0$	0,10 à 0,14

B.1.3 Chaussées urbaines

Pour les chaussées urbaines, la couche de roulement est définie selon le matériau de la couche d'assise et du trafic maximal supporté par la chaussée. Ces règles sont définies dans le Tableau B. 3. Il est à noter que les techniques d'enduit superficiel, de coulis, d'ECF, de BBTM et de BBUM sont largement utilisées lors de l'entretien des chaussées.

Tableau B.3 — Les différentes techniques de couche de roulement utilisées pour les chaussées urbaines

Type de voie	Couche de roulement	Couche d'assise
Voie de desserte TMJA \leq 25	Enduit superficiel	GNT
	BBM	GNT ou GB
	BBSG	GNT ou GB ou MTLH
	Béton de ciment	—
Voie de distribution TMJA \leq 150	ECF	GB ou BC
	Asphalte	BC
	BBM	GB ou GNT
	BBSG	GNT
	BBME	GNT
	Béton de ciment	BC2 ou MTLH ou GNT
Voie principale TMJA \leq 1 000	ECF	GB ou EME
	BBTM-BBUM	GB ou EME ou MTLH
	BBMa classe 3	GB ou GNT
	BBSG	EME ou MTLH ou GNT
	BBME	GB ou EME
	Béton de ciment	BC2 ou MTLH ou GB ou GNT

B.2 Couche de roulement en béton

En général, pour les structures béton, la couche de roulement constitue également la couche de base. Les caractéristiques des granulats et leur granularité sont choisies afin de satisfaire aux exigences d'adhérence. Le traitement de surface du béton (dénudage, balayage, grenailage, etc.) est également adapté selon les caractéristiques d'usage recherchées.

Dans certains cas, il peut cependant être fait le choix de mettre en œuvre une couche d'enrobé mince, très mince ou un enduit superficiel.

Annexe C (informative)

Valeurs de coefficient d'agressivité moyen (*CAM*)

La procédure de calcul du coefficient d'agressivité moyen est décrite dans la norme NF P 98-082. En l'absence de précision sur la composition du trafic (distribution des types d'essieux et des charges à l'essieu), les valeurs de *CAM*, fonction du type de chaussées, indiquées dans le Tableau C.1, dans le Tableau C.2 et dans le Tableau C.3 suivants s'appliquent.

Les chaussées à caractère autoroutier sont les autoroutes, les liaisons assurant la continuité du réseau autoroutier et les grandes liaisons d'aménagement du territoire. Ces chaussées se caractérisent par une part de Poids Lourds importante (supérieure à 10 %) et des configurations de Poids Lourds privilégiées à cinq essieux, voire plus.

Tableau C.1 — Coefficients d'Agressivité Moyen fonction du trafic et du type de matériaux pour les chaussées à caractère autoroutier

	T2	T1	T0	TS	Tex
CAM Matériaux Bitumineux	0,8				
CAM Matériaux Traités aux Liants Hydrauliques et béton	1,3				
CAM Sol, GNT	1				

Tableau C.2 — Coefficients d'Agressivité Moyen fonction du trafic et du type de matériaux pour les chaussées à caractère non autoroutier

	T5	T4	T3-	T3+	T2, T1, T0
CAM Matériaux Bitumineux	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5
CAM Matériaux Traités aux Liants Hydrauliques et béton	0,4	0,5	0,6	0,6	0,8
CAM Sol, GNT	0,4	0,5	0,6	0,75	1

Tableau C.3 — Coefficients d'Agressivité Moyen fonction du trafic et du type de matériaux pour les chaussées en milieu urbain

	Voie de desserte	Voie de distribution	Voie principale à trafic lourd
CAM Matériaux Bitumineux	0,1	0,2	0,2
CAM Matériaux Traités aux Liants Hydrauliques et béton	0,1	0,2	0,4
CAM sur giratoire	0,2	0,5	1,0

Annexe D

(normative)

Prise en compte de la partie supérieure des terrassements et de la couche de forme dans le dimensionnement des chaussées

D.1 Plate-forme de chaussée

La portance à long terme de la plate-forme de chaussée est évaluée soit sous chargement statique à la plaque, soit sous chargement dynamique. La détermination du module EV_2 sous chargement statique est définie dans la norme NF P 94-117-1. Sous chargement dynamique, le module E_{DYN2} est défini dans la norme NF P 97-117-2.

Les classes de portance à long terme de la plate-forme support de chaussée sont établies à partir des valeurs de module soit sous chargement statique, soit sous chargement dynamique comme indiquées dans le Tableau D.1.

Tableau D.1 — Classe de portance à long terme de la plate-forme support de chaussée

Module EV_2 ou E_{DYN2} (MPa)	20	50	80	120	200
Classe de plate-forme	PF1	PF2	PF2 ^{qs}	PF3	PF4

La classe PF2^{qs}, dénommée PF2 de qualité supérieure est une classe intermédiaire de calcul permettant de valoriser les plates-formes dont les caractéristiques de réception permettent d'assurer une valeur de portance à long terme comprise entre 80 MPa et 120 MPa. À ce jour, leur réception n'est pas normalisée.

D.2 Coefficient d'hétérogénéité de plate-forme pris en compte lors du dimensionnement

Le coefficient d'hétérogénéité, k_s , fonction de la plate-forme et utilisé lors des calculs de dimensionnement, est fourni dans le Tableau D.2.

Tableau D.2 — Valeurs de k_s pris en compte en fonction de la classe de portance à long terme de la plate-forme support

Module	$E < 50$ MPa	$50 \text{ MPa} \leq E < 80$ MPa	$80 \text{ MPa} \leq E < 120$ MPa	$E \geq 120$ MPa
k_s	1/1,2	1/1,1	1/1,065	1

D.3 Comportement au gel des matériaux constitutifs de la plate-forme

La classification des matériaux de la plate-forme en trois catégories, non gélifs (SGn), peu gélifs (SGp) et très gélifs (SGt) est déterminée en fonction de la pente de l'essai de gonflement au gel (selon NF P 98-234-2), suivant les fourchettes de valeur fournies dans le Tableau D.3.

Les essais de gonflement au gel prévalent. Toutefois, dans le cas où il n'est pas possible de disposer de tels résultats d'essai, les classes de sensibilité au gel mentionnées dans le Tableau D.4, à titre indicatif, peuvent être adoptées. Le Tableau D.4 a été élaboré en retenant pour chaque matériau la classe de sensibilité la plus élevée, rencontrée dans plus de 10 % des cas. Une application stricte de ce tableau peut donc conduire à surestimer la sensibilité au gel, en particulier sur les sols fins. Il n'est pas possible de se prononcer sur les matériaux ne figurant pas dans le Tableau D.4 en l'état actuel des connaissances. L'essai de gonflement est alors indispensable.

Enfin, en l'absence de cet essai, et pour les sols traités avec un liant hydraulique, le mélange doit atteindre, à la date de la première apparition statistique du gel, une résistance en traction diamétrale R_{tb} supérieure à 0,25 MPa pour être considéré comme non gélif. Ce seuil peut être éventuellement porté à 0,3 MPa lorsqu'il existe un risque d'alimentation en eau du matériau de couche de forme (zone de déblai, mal drainée en particulier). Cette résistance est définie par les études de traitement en laboratoire pour une température de référence de 20 °C.

Tableau D.3 — Classification des matériaux vis-à-vis de leur gélivité selon la norme NF P 98-080-1

0,05		0,40	Pente de l'essai (mm/(°C.h) ^{1/2})
SGn	SGp	SGt	

Tableau D.4 — Classes indicatives de sensibilité au gel

Classification géotechnique du sol ou matériau, non traité (au sens de la norme NF P 11-300)	Classe de sensibilité au gel pouvant être adoptée en l'absence d'essai de gonflement	Valeurs de Q_g en (°C.j) ^{1/2}
Matériaux insensibles à l'eau dont le passant à 80 µm est < ou = à 3 %	SGn	—
B1, B3, A3, A4	SGp	2,5 ($p = 0,4 \text{ mm}/(°\text{C.h})^{1/2}$)
A1, A2, B2, B4, B5, B6, R1, R3	SGt	0 ($p > 1 \text{ mm}/(°\text{C.h})^{1/2}$)

Le paramètre An permet d'évaluer la protection thermique apportée par les matériaux non gélifs. Sa valeur en fonction du matériau considéré est fournie dans le Tableau D.5.

Tableau D.5 — Valeurs de An en fonction de la nature du matériau de couche de forme

Matériaux	Non traités	Traités		
	GNT et matériaux insensibles à l'eau dont le passant à 80 µm est < ou = à 3 %	(C1) A1 – A2 – A3 traités à la chaux ou au liant hydraulique	(C1) B2 à B6 traités au liant hydraulique (avec ou sans chaux)	Cendres Volantes
$An \text{ (}^\circ\text{C.jour)}^{1/2} / \text{m}^{-1}$	12	14	13	17

A – B – C – D : classes de matériaux définies par la norme NF P 11-300

GNT : graves non traitées définies par les normes NF P 18-545 et NF EN 13285

Pour les chaussées urbaines, les coefficients de risque mentionnés dans le document de référence, Dimensionnement des structures des chaussées urbaines [6] sont rappelés dans le Tableau E.2. Ils sont indépendants du type de structure.

Tableau E.2 — Valeurs de risque, en à la classe de trafic pour les chaussées urbaines

	Voie de desserte	Voie de distribution	Voie principale à trafic lourd
Risque	25,0	25,0	5,0

E.2.2 Relation entre u , fractile de la loi normale et r , risque de dimensionnement

La relation entre u et r est définie par l'équation E.1. Elle traduit le fait que la variable aléatoire suit une loi normale centrée réduite.

$$r = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad \dots (E.1)$$

où :

r est le risque de dimensionnement ;

u est le fractile de la loi normale.

Les principales valeurs de u (fractile de la loi normale) associées au risque r sont définies dans le Tableau E.3.

Tableau E.3 — Valeurs de u associées au risque r

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

E.3 Indice de gel de référence

Les indices de gel des hivers exceptionnels et des hivers rigoureux non exceptionnels des principales stations météorologiques sur la période 1951-1997 sont fournis dans le Catalogue des structures types de chaussées neuves, en annexe 2 de la notice d'utilisation [2].

Ces valeurs caractérisent la station météorologique elle-même et ne sont pas toujours représentatives de l'ensemble d'un département. Pour déterminer l'indice de gel à retenir pour un projet éloigné d'une station météorologique principale, il est conseillé de recueillir les données disponibles auprès des postes climatologiques les plus proches du tracé.

E.4 Distribution par voie du trafic poids lourds

En l'absence de connaissance précise de la distribution par voie du trafic poids lourds, les répartitions suivantes sont adoptées :

- chaussées à 2 voies :
 - largeur < 5 m : TMJA = 100 % du trafic poids lourds (2 sens) ;
 - $5\text{ m} \leq \text{largeur} < 6\text{ m}$: TMJA = 75 % du trafic poids lourds (2 sens) ;
 - largeur $\geq 6\text{ m}$: TMJA = 50 % du trafic poids lourds (2 sens) ;
- chaussées à 2*2 voies en rase campagne :
 - voie lente : TMJA = 90 % du trafic poids lourds par sens ;
 - voie rapide : TMJA = 10 % du trafic poids lourds par sens ;
- chaussées à 2*2 voies en milieu péri urbain :
 - à définir au cas par cas ;
 - à défaut d'informations : voie lente : TMJA = 75 % du trafic poids lourds par sens ;
voie rapide : TMJA = 25 % du trafic poids lourds par sens ;
- chaussées à 2*3 voies en rase campagne :
 - voie lente : TMJA = 80 % du trafic poids lourds par sens ;
 - voie médiane : TMJA = 20 % du trafic poids lourds par sens ;
- chaussées à 2*3 voies en milieu péri urbain :
 - voie lente : TMJA = 65 % du trafic poids lourds par sens ;
 - voie médiane : TMJA = 30 % du trafic poids lourds par sens ;
 - voie rapide : TMJA = 5 % du trafic poids lourds par sens.

E.5 Définition des classes de trafic T_i

Les classes de trafic T_i ainsi que leurs moyennes géométriques (notées Mg) sont définies dans le Tableau E.4 pour les chaussées en péri-urbain et en rase campagne.

Tableau E.4 — Définition des classes de trafic T_i et de la moyenne géométrique associée en fonction du $TMJA$

Classe	T5		T4		T3		T2		T1		T0		TS		TEX
			T3 ⁻	T3 ⁺	T2 ⁻	T2 ⁺	T1 ⁻	T1 ⁺	T0 ⁻	T0 ⁺	TS ⁻	TS ⁺			
Mg	5	35	65	115	175	245	390	615	950	1550	2450	3875	5920		
$TMJA$	1	25	50	85	150	200	300	500	750	1200	2000	3000	5000	7000	

Les chaussées urbaines traitées dans ce document sont :

- les voies de dessertes à circulation réduite où le $TMJA$ est de 25 (T5) ;
- les voies de distribution où $TMJA$ est compris entre 25 et 150 (T4 et T3) ;
- les voies principales à trafic lourds où $TMJA$ est compris entre 150 et 1 000 (T2, T1 et T0).

Annexe F

(normative)

Caractéristiques des matériaux de chaussées pour le dimensionnement : partie normative

Les matériaux de chaussées sont traités dans l'Annexe F pour la partie normative et l'Annexe G pour la partie informative. Pour les chaussées urbaines, compte tenu de la difficulté de réalisation des travaux, il est fait usage de caractéristiques matériaux spécifiques, comme mentionnées dans le document [6].

F.1 Les graves non traitées

Les conditions d'emploi des GNT en fonction du trafic ainsi que celles définies pour leur emploi en couche de base lorsque $NE \leq 250\,000$ sont fournies en Annexe G. Les dispositions constructives relatives à ce matériau figurent en Annexe H.

Le Tableau F.1 donne les valeurs de module de rigidité pour les graves non traitées retenues dans le dimensionnement des chaussées. Le coefficient de Poisson est pris égal à 0,35 pour ces matériaux.

**Tableau F.1 — Valeurs de module de rigidité des couches de GNT
pour le dimensionnement**

Chaussées pour lesquelles la classe de trafic est inférieure ou égale à T3 <i>Catégories définies dans la norme NF EN 13285</i>									
couche de base	catégorie 1 : $E_{\text{GNT}} = 600$ MPa								
	catégorie 2 : $E_{\text{GNT}} = 400$ MPa								
	catégorie 3 : $E_{\text{GNT}} = 200$ MPa								
couche de fondation <i>(GNT subdivisée en sous-couches de 0,25 m d'épaisseur indiquée par i croissant de bas en haut)</i>	$E_{\text{GNT}} \{1\} = 3 E_{\text{plateforme-support}}$ $E_{\text{GNT}} \{\text{sous-couche } i\} = k E_{\text{GNT}} \{\text{sous-couche } (i-1)\}$ <i>k variant selon la catégorie de la GNT</i> <table border="1" style="margin: 10px auto;"> <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} borné par la valeur indiquée en couche de base Voir Tableau G.1	Catégorie	1	2	3	k	3	2,5	2
Catégorie	1	2	3						
k	3	2,5	2						
Chaussées pour lesquelles la classe de trafic est T2 ou T1 – structures bitumineuses épaisses avec fondation en GNT									
couche de fondation <i>(GNT subdivisée en sous-couches de 0,25 m d'épaisseur)</i>	$E_{\text{GNT}} \{1\} = 3 E_{\text{plateforme-support}}$ $E_{\text{GNT}} \{\text{sous-couche } i\} = 3 E_{\text{GNT}} \{\text{sous-couche } (i-1)\}$ E_{GNT} borné par 360 MPa								
Chaussées à structure inverse (GNT de type B)									
	$E_{\text{GNT}} = 480$ MPa								

NOTE Les différences de valeurs de module selon la structure rendent compte dans une certaine mesure du caractère non-linéaire des GNT et de leur accroissement de rigidité en fonction de leur contrainte moyenne (module plus élevé en couche de base qu'en couche de fondation, valeur plus élevée pour une faible couverture bitumineuse).

Pour les chaussées urbaines, la GNT retenue en couche de base est de classe B, catégorie 2. Son module est fixé à 400 MPa. En couche de fondation, la GNT est de classe A, catégorie 2 et son module est égal à 2,5 fois celui de la plate-forme.

F.2 Les matériaux traités aux liants hydrauliques

Les valeurs des paramètres de dimensionnement sont fonction de la catégorie des matériaux traités aux liants hydrauliques, établie en fonction des performances mécaniques estimées ou mesurées à 360 jours.

Le comportement élastique est apprécié par des essais de traction directe avec mesure de module d'élasticité (NF EN 13286-40 et NF EN 13286-43) sur éprouvettes réalisées en vibro-compression, conservées en étui étanche à une température de 20 °C.

Le comportement en fatigue est apprécié par des essais en flexion sur éprouvettes trapézoïdales encastrées à leur base (NF P 98-233-1). Par cet essai est déterminé le niveau de contrainte σ_6 correspondant à 10^6 cycles de chargement et l'écart type, S_N , de la dispersion du logarithme décimal de N à ce niveau de contrainte. À défaut, le comportement en fatigue est estimé à partir de la résistance en traction directe dont les relations de passage sont données à l'Article G.2.

En l'absence de résultats d'essai et pour les matériaux normalisés, les valeurs de module de rigidité et des paramètres de fatigue prises en compte dans le dimensionnement sont fournies ci-après. Des caractéristiques supérieures à ces valeurs minimales de module E et de résistance en fatigue σ_6 peuvent être prises en compte dans le dimensionnement, sous réserve que ces caractéristiques aient bien été obtenues lors de l'étude de formulation sur des matériaux élaborés avec les constituants du chantier. Les valeurs ne peuvent toutefois dépasser les valeurs de référence de la classe de matériau supérieure à celle du matériau en présence.

F.2.1 Graves traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques et bétons compactés routiers

Le Tableau F.2 regroupe les valeurs des paramètres de calcul retenues comme référence pour des graves traitées dont la composition et la réalisation sont conformes aux normes définies à l'Article 2. La dernière colonne porte les valeurs minimales correspondantes de R_{t360} à obtenir sur la formule de base.

Tableau F.2 — Valeurs de référence des paramètres de calcul pour les graves traitées aux liants hydrauliques conformes aux normes

Matériau	E (10^3 MPa)	σ_6 (MPa)	$-1/b$	S_N	S_h	$R_{t360 \text{ min}}$ (MPa)
Grave Ciment (T3)	23	0,75	15	1	0,03	1,15
Grave Liant Hydraulique Routier (T3)						
Grave Cendre Hydraulique (T3)						
Grave Ciment (T4)	25	1,2	15	1		1,8
Grave Laitier Granulé (T2)	15	0,60	12,5	1		0,90
Grave Laitier Prébroyé (activée à la chaux) (T2)						
Grave Laitier Prébroyé (T3) (activant sulfatique ou calcique)	20	0,70	13,7	1		1,05
Grave Cendre Volante Silicoalumineuse-Chaux (T3)	30	1,40	16	1		2,10
Béton compacté (T5)	28	1,85	15	1	2,8	

F.2.2 Sables traités aux liants hydrauliques

Du fait de la diversité d'origine des sables et de la variété de composition et de dosage en liant résultant 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.

Une réduction de 25 % appliquée aux valeurs de module de rigidité et de résistance obtenues sur la formule de base permet de rendre compte de la sensibilité de la formule à une variation de ses constituants.

En l'absence d'études de laboratoire spécifiques, des valeurs de référence pour les paramètres de calcul sont fournies dans le Tableau F.3.

Tableau F.3 — Valeurs des paramètres de calcul pour des sables traités aux liants hydrauliques conformes aux normes

Matériau	Classe Ti	E (10^3 MPa)	σ_6 (MPa)	$-1/b$	S_N	S_h
Sable Laitier ou Pouzzolanes-chaux	T3	12,5	0,65	10	0,8	0,025
	T2	8,5	0,425			
	T1	3,7	0,175			
Sable Ciment ou Sable Cendre Volante Silicoalumineuse-Chaux ou Sable Liant Hydraulique Routier	T3	17,2	0,75	12	0,8	0,025
	T2	12	0,50			
	T1	5	0,21			

F.2.3 Éléments communs aux matériaux traités aux liants hydrauliques

F.2.3.1 Coefficient de Poisson, k_d et k_c

Le coefficient de Poisson est pris égal à 0,25.

Le coefficient k_d introduit pour prendre en compte l'effet des discontinuités pour la couche de base est :

- de 1/1,25 pour les graves traitées de classe T4 (NF EN 14227) et pour le béton compacté ;
- de 1 pour les graves traitées de classe T2 ou T3 (NF EN 14227) et pour les sables traités.

Le coefficient k_c prend, quant à lui, les valeurs fournies dans le Tableau F.4.

Tableau F.4 — Valeur du coefficient k_c pour les matériaux traités aux liants hydrauliques

Matériau	k_c
Grave ciment et grave liants hydrauliques routiers de classe T3, T2	1,4
Autre MTLH	1,5

F.3 Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés

F.3.1 Généralités

La série des normes NF EN 13108 définit pour les mélanges bitumineux la formule d'un enrobé à partir des caractéristiques générales (granularité, caractérisation du pourcentage de vides (teneur en vides), sensibilité à l'eau (tenue à l'eau), et résistance aux déformations permanentes (essai à l'orniéreur) complétées par des caractéristiques empiriques ou par des caractéristiques fondamentales. Il est ainsi défini deux approches : l'approche dite **empirique** et l'approche dite **fondamentale**.

Ces deux approches étant incompatibles, les spécifications «empiriques» et «fondamentales» ne peuvent être combinées. Le choix de la méthode est fonction du matériau et du contexte d'application du document. Ainsi, par exemple, pour les BBTM, les EB-BBM et les BBD_r, les spécifications sont basées sur l'approche «**générale + empirique**».

Pour les matériaux où les deux approches sont possibles, le choix de la méthode utilisée doit être spécifié lors de l'application de ce document.

L'approche «**générale + fondamentale**» correspond aux études de formulations de niveau 3 ou 4 (NF EN 13108-20). Elle s'applique essentiellement aux matériaux à vocation structurelle. Elle permet de fournir les valeurs de module de rigidité et les performances en fatigue mesurées pour le dimensionnement des graves-bitume, des enrobés à module élevé, des bétons bitumineux à module élevé et plus rarement des bétons bitumineux semi-grenus.

Les caractéristiques complémentaires sont définies selon l'approche adoptée :

- caractéristiques «empiriques» : elles consistent à spécifier la teneur en bitume minimale du mélange (exprimée en pourcentage de la masse totale de l'enrobé), à préciser la nature du liant, et à fixer l'étendue de fuseaux granulométriques aux tamis caractéristiques ;
- caractéristiques «fondamentales» : elles s'appuient sur les mesures de module de rigidité et de la résistance à la fatigue. La résistance aux déformations permanentes peut être caractérisée par des essais de type compression répétée (NF EN 12697-25), qui ne sont pas utilisés dans les épreuves de formulation courantes, à la place de l'essai d'orniérage.

F.3.2 Éléments communs aux matériaux traités aux liants hydrocarbonés

F.3.2.1 Coefficient de Poisson, tolérance sur les épaisseurs des matériaux d'assise (S_h)

Le coefficient de Poisson est pris égal à 0,35.

La règle de calcul de S_h est donnée par l'équation F.1, où h est l'épaisseur de la couche d'assise. Si la plate-forme est réglée à plus ou moins 0,015 m, la dispersion de la couche de chaussée mise en œuvre sur celle-ci peut être prise égale à 0,015 m.

$$\begin{aligned}
 S_h &= 0,01 \text{ m si } h \leq 0,10 \text{ m} \\
 S_h &= 0,01 + 0,3 \times (h - 0,10) \text{ si } 0,10 < h < 0,15 \text{ m} \quad \dots \text{ (F.1)} \\
 S_h &= 0,025 \text{ m si } h \geq 0,15 \text{ m}
 \end{aligned}$$

F.3.2.2 Obtention des paramètres de dimensionnement sur les matériaux traités aux liants hydrocarbonés

Les caractéristiques des mélanges hydrocarbonés sont établies au cours d'une épreuve de formulation conduite en laboratoire suivant les modalités décrites dans la norme NF EN 13108-20, sur des matériaux représentatifs du chantier.

Les essais élémentaires de formulation sont décrits dans les normes de la série NF EN 12697.

Dans l'approche fondamentale, les données nécessaires au dimensionnement sont déduites de résultats d'essais normalisés sur des éprouvettes confectionnées en laboratoire.

Le module de rigidité E à 15 °C, 10 Hz (ou 0,02 s) est évalué par l'un des essais de module suivants (NF EN 12697-26) :

- l'essai en flexion deux points (NF EN 12697-26, Annexe A), en retenant le module à 15 °C et 10 Hz ;
- l'essai de traction directe, en retenant le module calculé à 0,02 s et 15 °C (NF EN 12697-26, Annexe E).

Le comportement en fatigue est apprécié par l'essai de fatigue en flexion (NF EN 12697-24, Annexe A) pratiqué à 10 °C et 25 Hz. La courbe de fatigue est représentée par une relation de la forme donnée par l'équation 7. La dispersion sur les résultats (sur $\log_{10} N$ à la rupture) est décrite par l'écart-type S_N .

Si la méthode empirique est retenue, le dimensionnement utilise les valeurs forfaitaires fournies ci-après.

F.3.3 Les graves-bitume (EB-GB)

Les graves-bitume sont rangées en trois classes de performances et en deux catégories selon leur granularité (0/14 ou 0/20). Leur classification peut être réalisée suivant l'approche empirique ou fondamentale telles qu'elles sont exposées dans la norme NF EN 13108-1. La classe EB-GB 4 impose une caractérisation suivant l'approche fondamentale.

F.3.3.1 Approche empirique

Les valeurs de module utilisées lors des calculs de dimensionnement sont fournies dans le Tableau F.5.

Tableau F.5 — Caractéristiques à prendre en compte pour le dimensionnement des EB-GB
(approche empirique)

	Classe	2	3
Valeurs conventionnelles de calcul	Module à 15 °C – 10 Hz ou 0,02 s (MPa)	9 000	9 000
	ε_6 (μ déf)	80	90
	$-1/b$	5	5
	S_N	0,3	0,3
	k_c	1,3	1,3

F.3.3.2 Approche fondamentale

Dans l'approche fondamentale, la norme NF EN 13108-1 sur les enrobés fixe dans son avant-propos les valeurs minimales de module E et de déformation ε_6 (à 10 °C et 25 Hz) par classe de matériau, rappelées dans le Tableau F.6. Ces valeurs sont utilisées pour réaliser un pré-dimensionnement avant l'obtention des résultats d'essais obtenus en laboratoire sur le matériau considéré.

Des caractéristiques supérieures à ces valeurs minimales de module E et de caractéristique en fatigue ε_6 peuvent être prises en compte dans le dimensionnement, sous réserve que ces caractéristiques aient bien été obtenues lors de l'étude de formulation sur des matériaux élaborés avec les constituants du chantier, avec le pourcentage de vide prescrit. Ces caractéristiques ne doivent cependant pas dépasser les valeurs maximales de la classe considérée (Tableau F.6).

Tableau F.6 — Caractéristiques mécaniques minimales et maximales de EB-GB à retenir pour le dimensionnement dans le cadre de l'approche fondamentale

	Classe	2	3	4
Valeurs minimales	Module à 15 °C – 10 Hz ou 0,02 s (MPa)	9 000	9 000	11 000
	ε_6 (μ déf)	80	90	100
Valeurs maximales	Module à 15 °C – 10 Hz ou 0,02 s (MPa)	11 000	11 000	14 000
	ε_6 (μ déf)	90	100	115
Valeurs à appliquer forfaitairement	$-1/b$	5	5	5
	S_N	0,3	0,3	0,3
	k_c	1,3	1,3	1,3

F.3.4 Les enrobés à module élevé (EB-EME)

Ces matériaux sont caractérisés suivant l'approche fondamentale. La norme NF EN 13108-1 sur les enrobés fixe dans son avant-propos les valeurs minimales de module E et de déformation ε_6 (à 10 °C et 25 Hz) par classe de matériau, rappelées dans le Tableau F.7. Ces valeurs sont utilisées pour réaliser un pré-dimensionnement avant l'obtention des résultats d'essais obtenus en laboratoire sur le matériau considéré.

Des caractéristiques supérieures à ces valeurs minimales de module E et de caractéristique en fatigue ε_6 peuvent être prises en compte dans le dimensionnement, sous réserve que ces caractéristiques aient bien été obtenues lors de l'étude de formulation sur des matériaux élaborés avec les constituants du chantier, avec le pourcentage de vide prescrit. Ces caractéristiques ne doivent cependant pas dépasser les valeurs maximales de la classe considérée (Tableau F.7).

Tableau F.7 — Caractéristiques mécaniques minimales et maximales de EB-EME à retenir pour le dimensionnement dans le cadre de l'approche fondamentale

	Classe	1	2
Valeurs minimales et valeurs conventionnelles	Module à 15 °C – 10 Hz ou 0,02 s(MPa)	14 000	14 000
	ε_6 (μdéf)	100	130
Valeurs maximales	Module à 15 °C – 10 Hz ou 0,02 s (MPa)	17 000	17 000
	ε_6 (μdéf)	115	145
Valeurs à appliquer forfaitairement	$- 1/b$	5	5
	S_N	0,3	0,25
	k_c	1	1

F.3.5 Matériaux hydrocarbonés pour couches de liaison et de roulement

Selon leur type, les matériaux pour couches de liaison et de roulement peuvent être caractérisés suivant l'approche empirique ou l'approche fondamentale. Le Tableau F.8 ci-dessous indique les approches permises par les normes.

Tableau F.8 — Approches de caractérisation pour les matériaux hydrocarbonés pour couches de liaison et de roulement

Produit	Norme	Désignation	Approche	
			E Empirique	F Fondamentale
			Permise par la norme	Conseillée
Béton Bitumineux Semi-Grenu	NF EN 13108-1	EB-BBSG classe 1, 2, 3	E ou F	E ou F
Béton Bitumineux à Module Élevé	NF EN 13108-1	EB-BBME classe 1, 2, 3	F	F
Béton Bitumineux Mince	NF EN 13108-1	EB-BBM classe 1, 2, 3	E, F	E
Béton Bitumineux pour chaussée Souple	NF EN 13108-1	EB-BBS	E,F	E
Béton Bitumineux Très Mince	NF EN 13108-2	BBTM	E	E
Béton Bitumineux Drainant	NF EN 13108-7	BBDr	E	E

F.3.5.1 Approche fondamentale

Pour les matériaux relevant de l'approche fondamentale (EB-BBME voire EB-BBSG), la norme NF EN 13108-1 fixe des valeurs minimales de module E (15 °C ; 10 Hz ou 0,02 s) et de déformation ε_6 (à 10 °C et 25 Hz), par classe de matériau.

La valeur de la déformation ε_6 est issue de l'essai de fatigue en flexion deux points (norme NF EN 12697-24+A1), à déformation imposée (à 10 °C et 25 Hz).

Sous réserve que les performances retenues sont bien obtenues avec les constituants du chantier, avec le pourcentage de vide prescrit, des caractéristiques supérieures aux valeurs minimales énoncées dans la norme peuvent être prises en compte dans le dimensionnement sans cependant dépasser les valeurs du Tableau F.9.

Tableau F.9 — Caractéristiques mécaniques minimales et maximales des matériaux pour couche de liaison et de roulement à retenir pour le dimensionnement dans l'approche fondamentale

		EB-BBSG		EB-BBME	
	Classe	1	2 et 3	1	2 et 3
Valeurs minimales et valeurs conventionnelles	Module à 15 °C – 10 Hz (MPa)	5 500	7 000	9 000	11 000
	ε_6 (μdéf)	100	100	100	100
Valeurs maximales	Module à 15 °C – 10 Hz (MPa)	9 000	11 000	11 000	14 000
	ε_6 (μdéf)	115	130	115	130
Valeurs à appliquer forfaitairement	$- 1/b$	5	5	5	5
	S_N	0,25	0,25	0,25	0,25
	k_c	1,1	1,1	1,1	1,1

F.3.5.2 Approche empirique

Pour les calculs de dimensionnement, pour les matériaux relevant de l'approche empirique, les valeurs de E , ε_6 , la pente de la courbe de fatigue b et l'écart-type S_N sur le logarithme décimal de N utilisées lors des calculs de dimensionnement sont fournies dans le Tableau F.10.

Tableau F.10 — Caractéristiques des matériaux pour couche de liaison et de roulement à retenir pour le dimensionnement dans l'approche empirique

Matériau	Valeurs conventionnelles de calcul				
	S (MPa) 15 °C – 10 Hz ou 0,02 s	ε_6 (μdef) 10 °C – 25 Hz	$- 1/b$	S_N	k_c
EB-BBSG classe 1	5 500	100	5	0,25	1,1
EB-BBSG classes 2 et 3	7 000	100	5	0,25	1,1
BB Minces (BBM)	5 500	Sans objet			
BB Très Minces (BBTM)	3 000				
BB Drainant (BBDr)	3 000				
Asphaltes Coulés Routiers (ACR)	5 500				

Les couches de roulement inférieures ou égales à 0,02 m ne sont pas prises en compte dans le calcul de dimensionnement.

F.4 Les bétons de ciment

Les paramètres de dimensionnement sont fonction de la catégorie du béton établie en fonction de la résistance mécanique à 28 jours conformément au Tableau 1 de la norme NF P 98-170. Seuls les essais de compression conformes à la norme NF EN 12390-3 et de fendage conformes à la norme NF EN 12390-6 sont retenus.

Le coefficient de Poisson est pris égal à 0,25. Le coefficient k_c est pris égal à 1,5 dans tous les cas.

Le paramètre S_h dépend du matériel de mise en œuvre et de la position de la couche dans la chaussée, comme le montre le Tableau F.11. Trois classes de matériel sont à distinguer :

- Matériel de type A : vibration de surface ;
- Matériel de type B : utilisation d'une batterie d'aiguilles vibrantes sur coffrage fixe ;
- Matériel de type C : machine à coffrage glissant répondant aux caractéristiques définies dans la norme NF P 98-734.

Tableau F.11 — Valeur du paramètre S_h pour les bétons de ciment

Type de matériel	A	B	C
Couche unique de béton sur couche de forme	0,03 m	0,03 m	0,03 m
Couche de base/roulement sur fondation en GH, BM ou enrobé	0,03 m	0,02 m	0,01 m

Les valeurs du coefficient k_d sont fournies dans le Tableau F.12.

Tableau F.12 — Valeur du coefficient k_d pour les bétons de ciment

	k_d
Dalles BC sur couche de forme ou BC/BM ou BC/GH	1/1,7
BCg/BM ou BCg/GH	1/1,47
BAC/BM	1/1,37
BCg/enrobé	1/1,37
BAC/GB3	1/1,07

Les valeurs de référence des paramètres de calcul pour les bétons de ciment sont fournies dans le Tableau F.13. Des caractéristiques supérieures à ces valeurs minimales de module E et de caractéristique en fatigue σ_6 peuvent être prises en compte dans le dimensionnement, sous réserve que ces caractéristiques aient bien été obtenues lors de l'étude de formulation sur des matériaux élaborés avec les constituants du chantier sans cependant dépasser les valeurs maximales fixées dans le Tableau F.13.

Tableau F.13 — Paramètres de calcul pour les bétons conformes à la norme NF P 98-170

	Catégories	2	3	4	5
Valeurs de référence	Module (MPa)	20 000	24 000	24 000	35 000
	σ_6 (MPa)	1,37	1,63	1,95	2,15
Valeurs maximales	Module (MPa)	22 000	24 000	29 500	35 000
	σ_6 (MPa)	1,50	1,79	2,09	2,39
Valeurs à appliquer forfaitairement	$-1/b$	14	15	15	16
	S_N	1	1	1	1

Le calcul du taux d'armatures longitudinales est régi par l'application de l'Équation F.2, équation de Vetter. Elle permet de calculer le taux de ferrailage du béton armé continu, la quantité d'acier à mettre en œuvre étant proportionnelle à la résistance en traction directe du béton. Dans cette formule, le coefficient de sécurité appliqué à l'acier est pris égal à 0,75.

$$P = (1,3 - 0,2 \times f) \frac{\sigma_{bt}}{0,75 \times \sigma_{ae} - N \times \sigma_{bt}} \times 100 \quad \dots \text{(F.2)}$$

où :

P est le rapport entre la section d'acier et celle du béton (en %) ;

f est le coefficient de frottement du béton sur sa fondation ;

σ_{bt} est la résistance en traction directe du béton (en MPa) ;

σ_{ae} est la limite élastique de l'acier (en MPa) ;

N est le rapport entre le module de l'acier et celui du béton.

Le Tableau F.14 indique les taux usuellement appliqués, Pa , en fonction de la nuance d'acier utilisée.

Tableau F.14 — Valeurs usuelles de Pa en fonction de la nuance d'acier utilisée

R_c du béton (en MPa)	2,63	2,15	1,95
FeE400	1,04	0,84	0,76
FeE450	0,92	0,74	0,67
FeE500	0,82	0,67	0,60

Annexe G
(informative)

**Caractéristiques des matériaux de chaussées
pour le dimensionnement : partie informative**

G.1 Les graves non traitées

Les conditions d'emploi sur les GNT en couche de base des chaussées à faible trafic sont fournies dans le Tableau G.1 conformément aux normes NF EN 13285 et NF P 18-545. Les conditions d'utilisation des GNT, en fonction du niveau de trafic, sont définies dans le Tableau G.2.

**Tableau G.1 — Conditions sur les GNT pour emploi
en couche de base des chaussées à faible trafic ($NE < 250\ 000$)**

Critère	Emploi en catégorie 1		Emploi en catégorie 2		Emploi en catégorie 3
	T3	$T < T3$	T3	T4 — T5	
Trafic	T3	$T < T3$	T3	T4 — T5	T5
d/D	0/14 ou 0/20		0/14 ou 0/20	0/31,5	Jusqu'à 0/60
Propreté du sable	b		c		$35 \leq ES_{10\%} < 45$
Caractéristique intrinsèque	C	D	C	D	$LA < 50$ et $M_{DE} < 45$
l_c	100	≥ 60	≥ 60	≥ 30	
Fines					$l_p \leq 6$

**Tableau G.2 — Conditions d'utilisation des GNT suivant leur type
ou leur classe de performances mécaniques déterminée
par l'essai Triaxial à Chargements Répétés (TCR)**

Usage	Classe de trafic			
	T5	T4	T3	T2, T1
Couche de base	A, B1, B2 ou classe mécanique C3	B1, B2 ou classe mécanique C3	B2 ou classe mécanique C2	Non admis
Couche de fondation	A, B1, B2 ou classe mécanique C3	A, B1, B2 ou classe mécanique C3	B2 ou classe mécanique C2	B2 ou classe mécanique C2
<p>Les GNT «A» et «B1» présentent une compacité à l'OPM de 80 %. La GNT «B2» présente, quant à elle, une compacité à l'OPM de 82 %.</p> <p>Dans le cas où les performances mécaniques de la GNT ont été déterminées au TCR (NF EN 13286-7), c'est la classe de performances mécaniques qui est prise en compte.</p>				

G.2 Les matériaux traités aux liants hydrauliques

G.2.1 Loi de fatigue commune aux matériaux traités aux liants hydrauliques

La forme de la loi de fatigue pour les matériaux traités aux liants hydrauliques est donnée par l'équation G.1.

$$\sigma = \sigma_6 \left(N / 10^6 \right)^b \quad \dots \text{ (G.1)}$$

où :

σ_6 est le paramètre représentant la contrainte conduisant à une durée de vie en fatigue par flexion de 10^6 cycles sur des éprouvettes dont le mûrissement est de 360 jours ;

b est la pente de la loi de fatigue du matériau ;

N est le nombre de cycles appliqués.

G.2.2 Graves traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques et bétons compactés routiers

Les relations entre les paramètres de dimensionnement et les grandeurs des essais en laboratoire sont fournies à travers les Équations G.2 et G.3. Les valeurs du coefficient R_{σ_6/R_t} sont fournies dans le Tableau G.3.

$$E = 0,9 \times E_{360} \quad \dots \text{ (G.2)}$$

où :

E est le module utilisé dans le calcul de dimensionnement ;

E_{360} est le module évalué à 360 jours.

$$\sigma_6 = 0,7 \times R_{\sigma_6/R_t} \times R_{t360} \quad \dots \text{ (G.3)}$$

où :

σ_6 est le paramètre représentant la contrainte conduisant à une durée de vie en fatigue par flexion de 10^6 cycles sur des éprouvettes dont le mûrissement est de 360 jours ;

R_{σ_6/R_t} est le coefficient de passage entre σ_6 et R_{t360} . Les valeurs de ce coefficient sont fournies dans le Tableau G.3 ;

R_{t360} est la résistance en traction simple évaluée à 360 jours.

Tableau G.3 — Valeurs indicatives du coefficient de passage R_{σ_6/R_t} pour les graves traitées au liant hydraulique

Matériau	R_{σ_6/R_t}
Grave Ciment	0,95
Grave Laitier granulé	0,96
Grave Laitier prébroyé (activée à la chaux)	
Grave Laitier prébroyé (activation sulfatique ou calcique)	1
Grave Cendre Volante Silicoalumineuses-Chaux	0,95
Béton compacté et graves hydrauliques à hautes performances	0,95

Les valeurs de résistances et de modules à 360 jours pour les graves traitées aux liants hydrauliques peuvent être estimées à partir des valeurs mesurées à 28 jours, 60 jours ou 90 jours par les coefficients de correspondance indiqués dans le Tableau G.4 (à défaut d'études spécifiques).

Tableau G.4 — Coefficients de correspondance à prendre en compte pour l'estimation des performances mécaniques à un an selon les normes de la série NF EN 14227

Mélange	Âge (jours), <i>n</i>	$R_t n/R_{t360}$	$E n/E_{360}$
Grave Laitier	90	0,70	0,70
Grave Liant Hydraulique Routier	60	0,65	0,70
Grave Cendre Volante Silicoalumineuse-Chaux	90	0,65	0,75
Grave Cendre Hydraulique	60	0,60	0,65
Grave Ciment	28	0,60	0,65

G.2.3 Sables traités aux liants hydrauliques

Les relations entre les paramètres de dimensionnement et les grandeurs des essais en laboratoire sont fournies à travers les équations G.4 et G.5. Les valeurs du coefficient R_{σ_6/R_t} sont fournies dans le Tableau G.5.

$$\sigma_6 = 0,75 \times R_{\sigma_6/R_t} \times R_{t360} \quad \dots (G.4)$$

où :

σ_6 est le paramètre représentant la contrainte conduisant à une durée de vie en fatigue par flexion de 10^6 cycles sur des éprouvettes dont le mûrissement est de 360 jours ;

R_{σ_6/R_t} est le coefficient de passage entre σ_6 et R_{t360} ;

R_{t360} est la résistance en traction simple évaluée à 360 jours.

$$E = 0,75 \times E_{360} \quad \dots (G.5)$$

où :

E est le module utilisé dans le calcul de dimensionnement ;

E_{360} est le module évalué à 360 jours.

Tableau G.5 — Valeurs indicatives du coefficient de passage R_{σ_6/R_t} pour les sables traités aux liants hydrauliques

Matériau	R_{σ_6/R_t}
Sable Laitier ou Pouzzolanes-chaux	0,85
Sable Ciment ou Cendre Volante Silicoalumineuse-Chaux ou cendres hydraulique ou Liant Hydraulique Routier	0,93

Les valeurs de résistances et de modules à 360 jours pour les sables traités aux liants hydrauliques peuvent être estimées à partir des valeurs mesurées à 28 jours, 60 jours ou 90 jours par les coefficients de correspondance indiqués dans le Tableau G.6, à défaut d'études spécifiques.

Tableau G.6 — Coefficients de correspondance à prendre en compte pour l'estimation des performances mécaniques à un an selon les normes de la série NF EN 14227

Mélange	Âge (jours), n	$R_t n/R_{t360}$	$E n/E_{360}$
Sable Laitier	90	0,70	0,75
Sable Liant Hydraulique Routier	60	0,65	0,70
Sable Cendre Volante Silicoalumineuse-Chaux	90	0,65	0,75
Sable Ciment	28	0,60	0,65

G.3 Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés

G.3.1 Loi de fatigue

La forme de la loi de fatigue pour les matériaux bitumineux est donnée par l'équation G.6.

$$\varepsilon = \varepsilon_6 \left(N/10^6 \right)^b \quad \dots \text{(G.6)}$$

où :

- ε_6 est le paramètre de la loi de fatigue du matériau bitumineux, représentant la déformation conduisant à une durée de vie de 10^6 cycles ;
- b est la pente de la loi de fatigue du matériau bitumineux ;
- N est le nombre de sollicitations appliquées.

G.3.2 Module de rigidité des matériaux bitumineux à 10 °C, 10 Hz

L'application de l'Équation 1 nécessite la connaissance du module de rigidité à 10 °C, 10 Hz des matériaux hydrocarbonés. Celui-ci est calculé à partir du ratio avec le module de rigidité à 15 °C, 10 Hz dont les valeurs en fonction du type de matériau sont fournies dans le Tableau G.7.

Tableau G.7 — Module de rigidité à 10 °C, 10 Hz des matériaux traités aux liants hydrocarbonés

	Matériaux	Ratio $E(10\text{ °C}, 10\text{ Hz})/E(15\text{ °C}, 10\text{ Hz})$
Valeurs conventionnelles de calcul	EB – GB2	1,32
	EB – GB3	1,32
	EB – GB4	1,30
	EB – EME1	1,21
	EB – EME2	1,21
	EB – BBSG1	1,33
	EB – BBSG2 et EB – BBSG3	1,33
	EB – BBME1	1,33
	EB – BBME2 et EB – BBME3	1,33

G.4 Les bétons de ciment

G.4.1 Loi de fatigue

La forme de la loi de fatigue pour les bétons de ciment est donnée par l'équation G.7.

$$\sigma = \sigma_6 \left(N / 10^6 \right)^b \quad \dots \text{(G.7)}$$

où :

σ_6 est le paramètre représentant la contrainte conduisant à une durée de vie en fatigue par flexion de 10^6 cycles sur des éprouvettes dont le mûrissement est de 360 jours ;

b est la pente de la loi de fatigue du matériau ;

N est le nombre de cycles appliqués.

La relation entre les paramètres de dimensionnement et les grandeurs des essais en laboratoire est donnée par l'équation G.8.

$$\sigma_6 = 0,65 \times f_t \quad \dots \text{(G.8)}$$

où :

σ_6 est le paramètre représentant la contrainte conduisant à une durée de vie en fatigue par flexion de 10^6 cycles sur des éprouvettes dont le mûrissement est de 360 jours ;

f_t est la résistance moyenne en traction par fendage (essai brésilien).

Pour les matériaux conformes à la norme NF P 98-170, le Tableau G.8 donne des valeurs représentatives des résistances moyennes à 28 jours en traction par fendage (f_t) à considérer dans la méthode de dimensionnement. Ces valeurs correspondent à des centrales de fabrication permettant d'obtenir un écart-type de 0,3 MPa sur les contrôles de résistance en fendage.

Tableau G.8 — Valeurs de référence pour les performances mécaniques des bétons normalisés

Matériau (catégorie : NF P 98-170)	$F_{t \text{ moyen}}$ (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

G.5 Paramètres des matériaux de chaussées liés au gel

Les paramètres des matériaux nécessaires à l'application de la méthode de vérification du gel/dégel sont fournis dans le Tableau G.9 et dans le Tableau G.10 pour les paramètres a et b .

Le calcul des capacités calorifiques est donné en Annexe I.

Tableau G.9 — 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_d (kg/m ³)	W (%)	k^{ng} (W.K ⁻¹ .m ⁻¹)	k^g (W.K ⁻¹ .m ⁻¹)
BB	2 350	1	2,00	2,10
GB	2 350	1	1,90	1,90
EME	2 390	1	2,35	2,40
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	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

Tableau G.10 — Valeurs des coefficients a et b en (°C.jour)^{1/2}.m⁻¹

Matériaux	BB – GB – EME	BC – GC – GL – GNT	GCV	LTCC	SL – SC
a	0,8	0,8	1,2	1,2	1,2
b	6	10	13	14	15

Annexe H

(normative)

Dispositions constructives spécifiques liées au dimensionnement

Ces dispositions s'appliquent aux chaussées en milieu interurbain.

H.1 Règles d'épaisseurs sur les matériaux

H.1.1 Grave Non Traitée

Pour un compactage optimal, l'épaisseur minimale de GNT est de 0,10 m pour une 0/14 et de 0,15 m pour une 0/20. L'épaisseur maximale compactée en une couche peut atteindre 0,35 m pour une grave 0/14 ou une grave 0/20. L'emploi des GNT de type B est à privilégier.

H.1.2 Matériaux traités aux liants hydrauliques

L'épaisseur minimale d'une couche de grave traitée ou de béton compacté est de 0,15 m. L'épaisseur maximale compactée en une seule couche est de 0,32 m (épaisseur après compactage) pour une grave 0/14 et pour une grave 0/20.

L'épaisseur minimale d'une couche de sable traité est de 0,18 m. L'épaisseur maximale compactée en une seule couche est de 0,32 m.

H.1.3 Matériaux traités aux liants hydrocarbonés

Les épaisseurs moyennes d'utilisation (NF P 98 150-1) de mise en œuvre des couches en grave-bitume sont comprises entre :

- 0,08 m et 0,14 m pour les EB14-GB ;
- 0,10 m et 0,16 m pour les EB20-GB.

Les épaisseurs moyennes d'utilisation de mise en œuvre des couches en enrobé à module élevé sont comprises entre :

- 0,06 m et 0,08 m pour les EB10-EME ;
- 0,07 m et 0,13 m pour les EB14-EME ;
- 0,09 m et 0,15 m pour les EB20-EME.

H.2 Surlargeurs des couches de chaussée

H.2.1 Structures bitumineuses ou à assise traitée aux liants hydrauliques

Par rapport à la largeur nominale de la chaussée, il est adopté de part et d'autre une surlargeur de la couche de roulement bitumineuse de 0,25 m. Pour assurer des conditions correctes d'exécution, chaque couche de chaussée présente, par rapport à la couche qu'elle supporte, une surlargeur de 0,20 m.

H.2.2 Structures en béton de ciment

Afin de réduire les sollicitations dans la dalle couche de Base-Roulement, il est défini une surlargeur de cette dalle en fonction du trafic comme indiqué dans le Tableau H.1.

La couche de fondation présente, par rapport à la dalle couche de Base-Roulement, une surlargeur de :

- 0,30 m côté droit, pour une fondation en grave traitée aux liants hydrauliques, et 0,10 m pour du béton maigre ou grave bitume ;
- 0,10 m côté Terre Plein Central (TPC).

Tableau H.1 — Surlargeur en m de la dalle pour les chaussées en béton

Classe de trafic	T0 – T1	T2	≤ T3
Côté droit	0,75	0,50	0,25
Côté TPC	0,25	0,25	0,25

H.3 Spécificités liées aux différentes structures de chaussée

H.3.1 Structure bitumineuse épaisse

Dans le cas où la couche d'assise comprend deux couches, l'épaisseur de la couche de fondation est égale ou supérieure d'un centimètre à l'épaisseur de la couche de base.

Dans le cas où la couche d'assise comprend trois couches, l'épaisseur de la couche la plus profonde est égale ou supérieure d'un centimètre à l'épaisseur de la couche intermédiaire, elle-même égale ou supérieure d'un centimètre à celle de la couche sus-jacente.

H.3.2 Structure semi-rigide

Pour toutes les structures semi-rigides, exceptées les chaussées à couche de fondation en sable hydraulique de classe 2, l'épaisseur de la couche de base est encadrée par l'épaisseur de la couche de fondation et celle-ci augmentée de 0,05 m.

Pour les structures GH/SH2, l'épaisseur de la couche de base est prise au moins égale à celle de la couche de fondation augmentée de 0,10 m.

Par rapport à la largeur nominale de la chaussée, il est adopté de part et d'autre une surlargeur de la couche de roulement bitumineuse de 0,25 m. Pour assurer des conditions correctes d'exécution, chaque couche de chaussée présente, par rapport à la couche qu'elle supporte, une surlargeur de 0,20 m.

Pour les structures à assises traitées aux liants hydrauliques, la préfissuration est obligatoire pour la couche de base :

- Lorsque le trafic cumulé est supérieur à 6,5 millions de PL ;
- Lorsque celle-ci est en grave-ciment de classe T4 ou de classe supérieure, quel que soit le trafic.

L'utilisation de systèmes retardant la remontée de fissures est possible mais se fait dans tous les cas en complément de la préfissuration.

H.3.3 Structure inverse

Par rapport à la largeur nominale de la chaussée, il est adopté de part et d'autre une surlargeur de la couche de roulement bitumineuse de 0,25 m. Pour assurer des conditions correctes d'exécution, chaque couche de chaussée présente, par rapport à la couche qu'elle supporte, une surlargeur de 0,20 m.

Annexe I

(informative)

Calcul de la température équivalente pour les matériaux bitumineux

Le comportement en 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 $\theta_{\text{éq}}$. Celle-ci est telle que la somme des dommages subis dans les couches bitumineuses de la chaussée pendant une année, pour la distribution annuelle de température du site considéré, soit égale au dommage que subirait la chaussée soumise au même trafic mais pour une température constante $\theta_{\text{éq}}$.

La température équivalente se détermine par application du principe de Miner.

Pour une température θ_i fixée, les grandeurs suivantes sont définies :

$\varepsilon(\theta_i)$ est la déformation maximale de traction dimensionnante des couches bitumineuses de la chaussée sous l'essieu standard de dimensionnement (valeur déterminée à partir du calcul structurel de la chaussée projetée, en fonction de la valeur des modules d'élasticité des couches bitumineuses à la température θ_i) ;

$\varepsilon_6(\theta_i)$ est l'amplitude de déformation pour laquelle la rupture en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de 10^6 cycles correspondant à une probabilité de 50 % à θ_i °C et pour la fréquence f de 25 Hz. On suppose :

$$\varepsilon_6(\theta_i) = \varepsilon_6(10 \text{ °C} ; 25 \text{ Hz}) \times \sqrt{\frac{E(10 \text{ °C} ; 10 \text{ Hz})}{E(\theta_i ; 10 \text{ Hz})}}$$

$N_i(\theta_i)$ est le nombre de chargements provoquant en laboratoire la rupture en fatigue pour le niveau de déformation $\varepsilon(\theta_i)$; d'après l'équation A.3 :

$$N(\theta_i) = 10^6 \left(\frac{\varepsilon(\theta_i)}{\varepsilon_6(\theta_i)} \right)^{1/b}$$

$n(\theta_i)$ est le nombre de passages d'essieux annuels équivalents subis par la chaussée, à la température θ_i .

La définition de la notion de température équivalente conduit à l'équation I.1.

$$\sum_i \left(\frac{n_i(\theta_i)}{N_i(\theta_i)} \right) = \frac{\sum_i n_i(\theta_i)}{N(\theta_{\text{éq}})} \quad \dots (I.1)$$

Compte tenu de l'expression de la fonction $N(\theta)$, la température équivalente est alors définie implicitement par l'équation :

$$\left(\frac{\varepsilon_6(\theta_{\text{éq}})}{\varepsilon(\theta_{\text{éq}})} \right)^{1/b} = \frac{1}{\sum_i n(\theta_i)} \left[\sum_i n(\theta_i) \left(\frac{\varepsilon_6(\theta_i)}{\varepsilon(\theta_i)} \right)^{1/b} \right] \quad \dots (I.2)$$

Nota : À travers cette définition, la température équivalente dépend *a priori* de la structure étudiée. En pratique cependant, il est souvent fait usage d'une température équivalente unique, fonction de la zone climatique considérée. $\theta_{\text{éq}}$ est alors déterminée à partir du calcul d'une structure de chaussée type, représentative du territoire considérée.

Annexe J

(normative)

Hypothèses du modèle de conduction thermique pour le dimensionnement au gel

Une structure poreuse contenant de l'eau gèle lorsqu'elle est soumise à l'action du froid. À tout instant peuvent coexister une zone gelée, où la température est inférieure à 0 °C, et une zone non gelée.

Ces deux zones sont séparées dans le modèle considéré par la surface isotherme $\theta = 0$ °C, appelée front de gel, dont la position *a priori* inconnue évolue en fonction du temps et fait partie des inconnues du problème. Sa détermination repose sur le bilan thermodynamique de changement de phase au niveau du front de gel (équation de Stefan).

Le modèle de conduction thermique de la méthode de dimensionnement est un modèle transitoire, unidimensionnel multi-couches (suivant la direction verticale z) et repose ainsi sur les équations suivantes.

Zone non gelée

L'équilibre thermique est traduit par l'équation de la chaleur sans terme source (Équation J.1).

$$c^{ng} \times \frac{\partial \theta}{\partial t} - k^{ng} \times \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \quad \dots (J.1)$$

où :

θ est la température ;

c^{ng} est la capacité calorifique volumique des matériaux de la partie non gelée ;

k^{ng} est la conductivité thermique des matériaux de la partie non gelée.

c^{ng} est calculée à partir de la relation :

$$c^{ng} = \rho_d \times c_{mat} + n^{por} \times \rho_w \times c_w^{ng}$$

où :

ρ_d est la masse volumique sèche du matériau ;

ρ_w est la masse volumique de l'eau (valeur unique pour les états gelé et non gelé) : 1 000 Kg/m³ ;

c_{mat} est la chaleur massique considérée unique pour l'ensemble des matériaux de chaussée et égale à 836 J/K/kg ;

c_w^{ng} est la chaleur massique de l'eau à l'état non gelé, égale à 4 180 J/K/kg ;

n^{por} est la porosité des matériaux supposés saturés, définie à partir de leur teneur en eau massique W (%) par la relation : $n^{por} = \frac{W(\%)}{100} \times \frac{\rho_d}{\rho_w}$; avec W (%) teneur en eau massique des matériaux, exprimée en pourcentage.

Zone gelée

L'équilibre thermique se traduit par l'équation de la chaleur sans terme source (Équation J.2).

$$c^g \times \frac{\partial \theta}{\partial t} - k^g \times \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \quad \dots (J.2)$$

où :

ρ^g est la masse volumique des matériaux à l'état gelé ;

c^g est la capacité calorifique volumique des matériaux de la partie gelée ;

k^g est la conductivité thermique des matériaux de la partie gelée ;

c^g est calculée à partir de la relation :

$$c^g = \rho_d \times c_{\text{mat}} + n^{\text{por}} \times \rho_w \times c_w^g$$

où :

c_w^g est la chaleur massique de l'eau à l'état gelé, égale à : 2 090 J/K/kg.

Front de gel

La surface de séparation entre les zones gelées et non gelées (front de gel) est le siège d'une discontinuité du gradient thermique appelée «saut de Stefan». Sa loi d'évolution (Équation J.3) fait intervenir les quantités, exprimées au niveau du front :

$$k^g \times \frac{\partial \theta^g}{\partial z} - k^{\text{ng}} \times \frac{\partial \theta^{\text{ng}}}{\partial z} = L \times n^{\text{porf}} \times \rho_w \times V^f \quad \dots \text{(J.3)}$$

où :

V^f est la vitesse de déplacement verticale (vers le haut ou le bas) du front de gel ;

k^{ng} est la conductivité thermique du matériau à l'état non gelé traversé par le front de gel ;

k^g est la conductivité thermique du matériau à l'état gelé traversé par le front de gel ;

θ^{ng} est la température dans la zone non gelée au voisinage du front de gel ;

θ^g est la température dans la zone gelée au voisinage du front de gel ;

L est la chaleur latente massique de l'eau, prise égale à 334 kJ/kg ;

n^{porf} est la porosité du matériau situé au niveau du front de gel.

Les valeurs numériques utilisées en fonction des matériaux sont données en Annexe G.

Annexe K (informative)

Détermination d'un coefficient de calage k_c

K.1 Objet

Un modèle de calcul de dimensionnement décrit partiellement le comportement réel d'une chaussée ; il est donc impératif de vérifier par des observations sur chaussées réelles, intégrées ou non à un réseau routier, les résultats des calculs issus du modèle.

La confrontation des résultats du modèle et des observations *in situ*, pour un type de structure, a pour objectif :

- de valider le modèle de calcul en comparant les contraintes, les déformations et les déplacements calculés et ceux mesurés sur chaussée pour déterminer les correspondances à appliquer aux valeurs calculées afin qu'elles soient en correspondance avec les valeurs mesurées ;
- de déterminer les corrections à appliquer aux valeurs admissibles de façon que la durée de vie de la structure soit en réelle concordance avec celle observée sur le terrain, à même niveau de risque.

Ces deux opérations sont réalisées par une suite de confrontations – dimensionnement théorique/observations du comportement des chaussées réelles – étalées dans le temps, parfois sur plusieurs années.

K.2 Méthodologie

Pour chaque type de chaussée, la validation du modèle est réalisée sur des sections de chaussées réelles par la mesure des paramètres correspondant aux critères limites choisis et par comparaison avec des sections témoins.

Ces sections peuvent être équipées de capteurs. À défaut, on admet pour les chaussées traitées aux liants hydrauliques ou bitumineux, la mesure des déplacements relatifs à l'aide de l'essai d'ovalisation.

Pour les chaussées souples, on procède à des mesures de déflexion (NF P 98-200-1) et de rayon de courbure au droit de la charge de référence.

Les sections témoins sont :

- soit un ensemble de sections intégrées à un réseau routier existant. Les expériences sur ces sections doivent comporter un justificatif sur les effets climatiques et de vieillissement ainsi que sur les dispersions réelles ;
- soit des installations d'essais accélérés en vraie grandeur dans la mesure où celles-ci sont de dimensions suffisantes.

La longueur de ces sections témoins doit être suffisante et représentative pour se retrouver dans des conditions classiques de fabrication et mise en œuvre (30 m de long et 2,50 m de large).

Pour chacune de ces sections témoins, on dispose des informations suivantes :

- le nombre équivalent d'essieux ou de charges de référence, NE ;
- la nature, l'épaisseur et les caractéristiques des couches constituant la chaussée, notamment la composition et les performances mécaniques des matériaux constitutifs de ces différentes couches et également du sol support ;
- le type de liaison entre les différentes couches ;
- les résultats du contrôle et réalisation du chantier.

Pour des techniques entièrement nouvelles, le nombre de sections témoins doit être suffisamment élevé (de 5 à 15) pour permettre une interprétation statistique.

Annexe L

(informative)

Cas tests de structures pour la validation de la méthode de calcul des contraintes et déformations

Les jeux de données et de résultats de cette annexe sont destinés à vérifier sur un ensemble de cas diversifiés, la précision de la méthode de calcul choisie pour effectuer le calcul des sollicitations mécaniques (contraintes, déformations) induites par la charge de référence dans la structure de chaussée.

Le terme «méthode» désigne aussi bien l'outil de calcul utilisé (par exemple abaques, programme de calcul de solution semi-analytique, logiciel d'éléments finis, etc.) que les conditions de sa mise en œuvre, qui peuvent entrer simultanément en ligne de compte dans la précision des calculs. Dans le cas par exemple de l'utilisation de la méthode des éléments finis, la précision sera essentiellement liée à ses conditions de mise en œuvre, à travers la finesse du maillage utilisé et l'éloignement de ses frontières par rapport à la charge.

Pour satisfaire au critère de précision du paragraphe 5.3, les sollicitations dimensionnantes, calculées, doivent être convenablement :

- identifiées (déformation ou contrainte horizontale -longitudinale, transversale — ou verticale suivant la nature du critère de valeurs admissibles concerné)
- localisées (c'est-à-dire suivant les cas, sous centre de roue ou centre de jumelage, en base de couche pour les sollicitations horizontales, ou en sommet de couche pour les sollicitations verticales)
- et appartenir aux fourchettes de valeurs indiquées dans les colonnes de droite des tableaux suivants, établis pour le jumelage standard français de 65 kN.

Nota — convention de signe adoptée ci-après :

signe > 0 → déformations de contraction, contraintes de compression ;

signe < 0 → déformations d'extension, contraintes de traction

L.1 Structure souple

Origine du jeu de données : fiche n° 27 du Catalogue des structures types de chaussées neuves (édition 1998), trafic cumulé TC2, plate-forme PF4, réseau non structurant.

Matériaux	Épaisseur (m)	Interface avec couche du dessous	Module de rigidité (MPa)	Coefficient de Poisson	Fourchette de résultats requis
BB	0,05	collée	5 400	0,35	
GNT	0,15	collée	600	0,35	
PF4	infinie		200	0,35	$\varepsilon_z (\mu_{\text{def}})$ centres roues 772 ± 4

L.2 Structure bitumineuse épaisse

Origine du jeu de données : fiche n° 3 du Catalogue des structures types de chaussées neuves (édition 1998), trafic cumulé TC4, plate-forme PF4, réseau non structurant.

Matériaux	Épaisseur (m)	Interface avec couche du dessous	Module de rigidité (MPa)	Coefficient de Poisson	Fourchette de résultats requise
BB	0,025	collée	5 400	0,35	
EME2	0,10	collée	14 000	0,35	$\varepsilon_{\text{longi}} (\mu_{\text{def}})$ centres roues – 124 ± 1
PF4	Infinie		200	0,35	$\varepsilon_z (\mu_{\text{def}})$ centres roues 439 ± 3

Origine du jeu de données : fiche n° 3 du Catalogue des structures types de chaussées neuves (édition 1998), trafic cumulé TC5, plate-forme PF2, réseau structurant.

Matériaux	Épaisseur (m)	Interface avec couche du dessous	Module de rigidité (MPa)	Coefficient de Poisson	Fourchette de résultats requise : idem tableau 1
BB	0,025	collée	5 400	0,35	
EME2	0,11	collée	14 000	0,35	
EME2	0,12	collée	14 000	0,35	$\varepsilon_{\text{longi}} (\mu_{\text{def}})$ centre jumelage – 66,0 ± 0,4
PF2	Infinie		50	0,35	$\varepsilon_z (\mu_{\text{def}})$ centre jumelage 251 ± 2

L.3 Structure semi-rigide

Origine du jeu de données : fiche n° 4 du Catalogue des structures types de chaussées neuves (édition 1998) trafic cumulé TC5, plate-forme PF2, réseau structurant.

Matériaux	Épaisseur (m)	Interface avec couche du dessous	Module de rigidité (MPa)	Coefficient de Poisson	Fourchette de résultats requise
BB	0,08	collée	5 400	0,35	
GC3	0,22	semi-collée	23 000	0,25	σ_{longi} (MPa) centre jumelage – 0,454 ± 0,003
GC3	0,20	collée	23 000	0,25	σ_{longi} (MPa) centre jumelage – 0,562 ± 0,003
PF2	infinie		50	0,35	$\varepsilon_z (\mu_{\text{def}})$ centre jumelage 93,6 ± 0,5 Valeur non dimensionnante en pratique

L.4 Structure rigide

Origine du jeu de données : fiche n° 22 du Catalogue des structures types de chaussées neuves (édition 1998), trafic cumulé TC5, plate-forme PF2, réseau structurant.

Matériaux	Épaisseur (m)	Interface avec couche du dessous	Module de rigidité (MPa)	Coefficient de Poisson	Fourchette de résultats requise
BC5	0,23	glissante	35 000	0,25	σ_{longi} (MPa) centre jumelage – 1,266 ± 0,006
BC2	0,18	collée	20 000	0,25	σ_{longi} (MPa) centre jumelage – 0,553 ± 0,003
PF2	infinie		50	0,35	ε_z (μ_{def}) centre jumelage 125 ± 1 Valeur non dimensionnante en pratique

Annexe M
(informative)
Symboles et abréviations

M.1 Matériaux

ACR	Asphalte cloué Routier
BAC	béton armé continu
BB	béton bitumineux
BBDr	béton bitumineux drainant
BBM	béton bitumineux mince
BBME	béton bitumineux à module élevé
BBSG	béton bitumineux semi-grenu
BBTM	béton bitumineux très mince
BBUM	béton bitumineux ultra-mince
BC	béton de ciment
BCg	béton de ciment goujonné
BM	béton maigre
EB	enrobé bitumineux
EME	enrobé à module élevé
EB — GB	grave-bitume
ESU	enduit superficiel d'usure
GC	grave-ciment
GCV	grave-cendres volantes
GH	grave traitée aux liants hydrauliques
GL	grave-laitier
GNT	grave non traitée (de type «A» ou «B»)
GPz	grave-pouzzolanes-chaux
LTCC	limons traités à la chaux et au ciment
MTLH	matériaux traités aux liants hydrauliques
SC	sable traité au ciment
SL	sable traité au laitier

M.2 Paramètres de dimensionnement

d	durée de dimensionnement (années)
E	module d'Young de la loi de Hooke, utilisée pour caractériser la rigidité des matériaux (MPa)
$E(\theta, f)$	norme du module complexe à la température θ et à la fréquence f (MPa)
f	fréquence (Hz)
k_C	coefficient de calage
k_d	coefficient tenant compte dans le calcul des contraintes admissibles des discontinuités des structures de chaussées en béton et semi-rigides et de l'incidence des gradients thermiques pour les chaussées béton et semi-rigides
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
r	risque de calcul
$\varepsilon_{t,adm}$	déformation réversible horizontale admissible en extension
$\varepsilon_{z,adm}$	déformation réversible verticale admissible en compression
ε_t	déformation réversible en extension maximale dans le plan horizontal
ε_z	déformation réversible verticale maximale
ε_6	amplitude de déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette d'enrobés bitumineux est obtenue au bout de 10^6 cycles au moins avec une probabilité de 50 %, à 10 °C et 25 Hz
$\varepsilon_6(\theta, f)$	amplitude de déformation pour laquelle la rupture en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de 10^6 cycles au moins avec une probabilité de 50 %, à θ °C et pour une fréquence f
ν	coefficient de Poisson
θ	température de calcul (°C)
θ_{eq}	température équivalente (°C)
$\sigma_{t,adm}$	contrainte admissible en traction à la base d'une couche (MPa)
σ_t	contrainte en traction 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)

M.3 Support de chaussée

AR_i	classe i de portance à long terme de l'arase de terrassement
PF_j	classe j de portance à long terme de la plate-forme support de chaussée
PST	partie supérieure des terrassements

M.4 Essais et grandeurs mesurées

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
R_c	résistance en compression simple (MPa)
R_f	résistance à la flexion (MPa)
R_t	résistance à la traction directe (MPa)

M.5 Trafic

<i>A</i>	agressivité d'un trafic
<i>CAM</i>	coefficient d'agressivité moyenne du poids lourd par rapport à l'essieu de référence
<i>N_{PL}</i>	nombre cumulé de poids lourds sur la période de calcul retenue ou trafic cumulé
τ	taux de croissance du trafic (%)
<i>C</i>	coefficient de cumul du trafic
<i>NE</i>	nombre équivalents d'essieux de référence correspondant au trafic poids lourds cumulé sur la durée de calcul retenue
<i>TMJA</i>	trafic moyen journalier annuel
<i>PL</i>	poids lourd (véhicule de charge utile supérieure ou égale à 50 kN)
<i>T_i</i>	classe de trafic à la mise en service
<i>Mg</i>	moyenne géométrique de la classe de trafic considérée

M.6 Vérification au gel-dégel

<i>c_{mat}</i>	chaleur massique unique utilisée pour l'ensemble des matériaux de chaussée, égale à 836 J/K/kg
<i>c_w^g</i>	chaleur massique de l'eau à l'état gelé, égale à 2 090 J/K/kg
<i>c_w^{ng}</i>	chaleur massique de l'eau à l'état non gelé, égale à 4 180 J/K/kg
<i>h_n</i>	épaisseur des matériaux non gélifs de la plate-forme (m)
<i>h_p</i>	épaisseur des matériaux peu gélifs de la plate-forme (m)
<i>HE</i>	hiver exceptionnel
<i>HRNE</i>	hiver rigoureux non exceptionnel
<i>I_{atm}</i>	indice de gel atmosphérique (°C.jour)
<i>IA</i>	indice de gel admissible par la chaussée (°C.jour)
<i>IR</i>	indice de gel de l'hiver de référence (°C.jour)
<i>IS</i>	indice de gel de surface (°C.jour)
<i>It</i>	indice de gel transmis à la base de la structure de chaussée (°C.jour)
<i>k^g</i>	conductivité thermique du sol gelé (W/m.°C)
<i>k^{ng}</i>	conductivité thermique du sol non gelé (W/m.°C)
<i>n^{por}</i>	porosité des matériaux supposés saturés
<i>n^{porf}</i>	porosité du matériau situé au niveau du front de gel
<i>p</i>	pente obtenue à l'essai de gonflement au gel ((mm/(°C.heure) ^{1/2})
<i>Q_{PF}</i>	quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme ((°C.jour) ^{1/2})
<i>Q_g</i>	quantité de gel admissible à la surface des matériaux gélifs du sol support transmise aux couches de sol gélives ((°C.jour) ^{1/2})
<i>Q_{ng}</i>	protection thermique apportée par les matériaux non gélifs de la couche de forme et du sol support ((°C.jour) ^{1/2})
<i>Q_M</i>	quantité de «gel mécanique» ; 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}) ou quantité de gel supplémentaire admissible à la surface des matériaux gélifs du sol support, issue de l'acceptation d'un surcroît de dommage limité en période de dégel pour les chaussées présentant des matériaux liés d'une épaisseur suffisante
<i>V^f</i>	vitesse verticale du front de gel (m/s)
<i>W(%)</i>	teneur en eau massique des matériaux, exprimée en pourcentage
<i>ρ_d</i>	masse volumique sèche du matériau
<i>ρ_w</i>	masse volumique de l'eau

Bibliographie

- [1] Conception et dimensionnement des structures de chaussée, SETRA-LCPC, 1994.
- [2] Catalogue des structures types de chaussées neuves, SETRA-LCPC, 1998.
- [3] Réalisation des remblais et des couches de formes «GTR», guide technique, SETRA-LCPC, 1992.
- [4] Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques «GTS» — Application à la réalisation des remblais et des couches de forme, guide technique, SETRA-LCPC, 2000.
- [5] Dimensionnement des chaussées, cours de routes, Peyronne C., Caroff G., presses de l'ENPC, Paris, 1984.
- [6] Dimensionnement des chaussées urbaines, guide technique, CERTU, 2000.
- [7] Conception structurelle d'un giratoire en milieu urbain, guide technique, CERTU, 2000.
- [8] Enrobés hydrocarbonés à chaud — Guide d'application des normes pour le réseau routier national «GUN», SETRA-LCPC, 1994.
- [9] Enrobés bitumineux à chaud — Mise en application des nouvelles normes NF EN, fiche d'information, IDRRIM (ex CFTR), 2008.
- [10] Construction des chaussées neuves sur le réseau routier national — Spécifications des variantes, guide technique, SETRA-LCPC, 2002.
- [11] Validation des guides techniques régionaux, fiche d'information, IDRRIM (ex CFTR), 2004.
- [12] Comportement thermique d'une structure routière soumise à un cycle de gel-dégel ; simulations expérimentale et numérique, Frémond M., Caniard L., Dupas A., Lévy M., Coll. Interdisciplinaire «Les problèmes posés par la gélifraction», Recherches Fondamentales et Appliquées, Paris-Le Havre, 1975.
- [13] Gel des sols et des chaussées, ouvrage collectif sous la direction de Frémond M. et Williams P., Presses des Ponts et Chaussées (Paris) pour l'éd. Française, Carleton University (Ottawa, Canada) pour l'éd. anglaise, 1979.
- [14] Struct-Urb, logiciel de dimensionnement de chaussées urbaines, CERTU, 2008.
- [15] NF P 98-200-1, *Essais relatifs aux chaussées — Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante — Partie 1 : Définitions, moyens de mesure, valeurs caractéristiques.*
- [16] NF EN 10080, *Acier pour l'armature du béton — Aciers soudables pour béton armé — Généralités* (indice de classement : A 35-010).
- [17] NF EN 13286-7, *Mélanges avec ou sans liant hydraulique — Partie 7 : essai triaxial sous charge cyclique pour mélanges sans liant hydraulique* (indice de classement : P 98-846-7).
- [18] Directive n° 96/53/CE, du 25 juillet 1996, *fixant, pour certains véhicules routiers circulant dans la communauté, les dimensions maximales autorisées en trafic national et international et les poids maximaux autorisés en trafic international.*