

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

Synthèse des méthodes de dimensionnement de chaussées souples / routes non revêtues à l'international

Auteur(s) / Organisme(s) :

Annamária VARGA – Egis

Patricia MAILLARD-NUNES - Egis

Thème de rattachement :

Thème 1 – Mécanisme de dégradations

1.2 – Sols supports et chaussées souples

Numéro de rapport (à établir par l'IRES)

N° lettre de commande LC/19/DVDC/120

Complément LC/17/DVDC/16

13/11/2020

Site internet : www.dvdc.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Christine LEROY et Simon POUGET

Gestion administrative et financière : IRES (www.ires.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@ires.asso.fr

Sommaire

Sommaire	2
1 Résumé	6
2 Introduction	7
2.1 Composition du document	7
2.2 Constitution d'une chaussée : terminologie	9
3 Méthodes de dimensionnement des chaussées souples	11
3.1 Périmètre de l'étude	11
3.2 Les différents types de dimensionnement	11
3.3 Les méthodes empiriques	12
3.3.1 Méthode AASHTO	12
3.3.2 Déclinaisons de la méthode AASHTO	17
Figure 5 – Détermination de l'épaisseur de la chaussée	18
Figure 6 – Dimensionnement de la chaussée	18
Figure 7 – Utilisation de la méthode AASHTO, sondage 2007	20
Figure 8 – Protection contre le gel au Canada	20
3.3.3 Méthode DMRB	27
3.4 Les méthodes analytiques	31
3.4.1 La méthode Austroads	31
3.4.1 La méthode Belge	32
3.4.2 Limites admissibles	37
3.4.3 Valeurs réelles	40
3.5 Les catalogues des chaussées	41
3.5.1 Méthode Espagnole	41
3.5.2 Méthode TRL Overseas Road Note 31	42
3.5.3 Méthode SATCC – Afrique du Sud	43
3.5.4 Méthode Allemande –RStO R1 – édition 12	45
3.6 Modélisation de la plate-forme	51
3.6.1 Coefficient de Poisson	51
3.6.2 Module de la plate-forme	52
3.6.3 CBR	56
3.7 Matériaux	63
4 Méthodes de dimensionnement des chaussées non revêtues	68
4.1 Généralités	68
4.2 Présentation de méthodes	69
4.2.1 Méthode de Tanzanie	69
4.2.2 Méthode AASHTO	71

4.2.3	Catalogue AASHTO	75
4.2.4	Méthode CEBTP.....	76
4.2.5	Méthode VIZIRET	79
4.2.6	Conclusions des méthodes routes non revêtues	80
5	Synthèse des hypothèses et données d'entrée des méthodes	81
6	Exemple d'application de huit méthodes	85
7	Conclusions	87
8	Références Bibliographiques	89
9	Abréviation et symboles	91
10	Annexe – Exemples d'application	94
10.1	Méthode Française	95
10.2	Guide AASHTO 1993	95
10.3	Méthode Canadien	96
10.4	Guide DMRB	99
10.5	Guide Japonais.....	101
10.6	Catalogue Espagnol - Norme 6.1 IC-Seccionnes de Firmes_2003	102
10.7	Catalogue Sénégal	103
10.8	Catalogue Allemand RStO12.....	103

Tables des illustrations

Figure 1 - Constitution d'une structure de chaussée.....	9
Figure 2 - Variation annuelle de la valeur de M_R selon le Guide AASHTO	13
Figure 3 – Détermination de la coefficient a_2 - couche de base, selon le guide AASHTO ...	15
Figure 4 – Détermination de la coefficient a_3 - couche de fondation, guide AASHTO.....	16
Figure 5 – Détermination de l'épaisseur de la chaussée.....	18
Figure 6 – Dimensionnement de la chaussée.....	18
Figure 7 – Utilisation de la méthode AASHTO, sondage 2007.....	20
Figure 8 – Protection contre le gel au Canada.....	20
Figure 9 - Schéma de la structure de chaussées - Méthode Japonaise.....	22
Figure 10 - Équation pour le calcul de l'épaisseur totale de la structure.....	23
Figure 11 - Corrélation entre indice de gel et épaisseur de protection au gel.....	24
Figure 12 - Schéma structure type chaussées à faible trafic.....	26
Figure 13 – Graphique pour le dimensionnement de chaussées souples, guide DMRB	28
Figure 14 - Plate-forme Classe 1-3 – Solution avec une seule couche (fondation ou forme)	30
Figure 15 - Plate-forme Classe 2 – Solution avec couche de fondation et couche de forme	30
Figure 16 – Abaque de dimensionnement pour les chaussée souple, guide Austroads.....	32
Figure 17 – Abaque - Épaisseur des couches en empierrement et en matériaux traités aux liants hydrocarbonés en fonction du trafic	35
Figure 18 - Épaisseur de la couche de sous-fondation (couche de forme) en fonction du trafic $k_x N_c \times$ module du sol E_s	35
Figure 19 - Conditions de dimensionnement de la protection au gel.....	36
Figure 20 - Gélivité des sols fins.....	37
Figure 21 - Évolution de la déformation verticale du sol admissible en fonction du NE	38
Figure 22 – Structures proposées selon le Catalogue Espagnole.....	41

Figure 23 – Structures de chaussées souples, selon le Road Note 31	43
Figure 24 - Structures de chaussées souples, selon le Catalogue SATCC.....	44
Figure 25 - Structure F1 avec $E_{v2} \geq 120$ MPa).....	46
Figure 26 - Carte des zones climatiques allemandes	47
Figure 27 - Catalogue Allemand RStO - Plate 1	49
Figure 28 - Catalogue Allemand RStO - Plate 2	50
Figure 29 - Évolution du module E du sol support en fonction de son CBR	55
Figure 30 - Évolution du CBR d'un sol en fonction des résultats du DCP (mm/blow).....	58
Figure 31 – Surclassement de la couche de forme selon la méthode de Tanzanie.....	62
Figure 32 - Évolution du CBR d'un sol en fonction des résultats du DCP (mm/blow).....	62
Figure 33 - Caractéristiques de la couche de surface, GW, routes principales	70
Figure 34 - Abaque d'AASHTO basé sur la perte de niveau de service	72
Figure 35 - Abaque AASHTO, basé sur l'orniérage admissible.....	73
Figure 36 – AASHTO - Dommages pour différentes épaisseurs de couche de base	74
Figure 37 – AASHTO – Équivalence couche de base et fondation	75
Figure 38 - Exemple de calcul de CBR pour une route en terre [2].....	77
Figure 39 - Abaques de Road Research Laboratory [2].....	78
Figure 40 - Synthèse exemples application 8 méthodes/guides/catalogues - Structure 5BB/8GB3/15GNT/PF2	86
Tableau 1 Liste des documents de référence	8
Tableau 2 – Modèles pour déterminer la valeur M_R	14
Tableau 3 - Qualité du drainage selon le guide AASHTO	17
Tableau 4 - Valeurs de drainage m_i selon le guide AASHTO.....	17
Tableau 5 - Coefficients d'équivalence selon la méthode brésilienne	19
Tableau 6 - Profondeur P	21
Tableau 7 - Épaisseur de la sous-couche granulaire [18]	22
Tableau 8 - TMJA et nombre d'essieux standards sur une période de dimensionnement de 10 ans	23
Tableau 9 - Épaisseurs minimales pour la couche de base en fonction du trafic et du matériau	24
Tableau 10 - Coefficient d'équivalence pour les matériaux de chaussées	25
Tableau 11 - Épaisseur totale de la chaussée en fonction du CBR	26
Tableau 12 - Épaisseur totale de la chaussée avec des matériaux traités ou stabilisés.....	26
Tableau 13 - Exemples de matériaux traités aux liants hydrauliques.....	27
Tableau 14 - Estimation du CBR du sol, selon la méthode DMRB.....	29
Tableau 15 - Classes de trafic en fonction du type de route (par sens sur la voie la plus chargée).....	34
Tableau 16 - Classes de trafic.....	45
Tableau 17 - Épaisseur minimale pour la protection au gel/dégel en fonction de la classe de trafic	46
Tableau 18 - Épaisseur à additionner ou réduire en fonction de la zone climatique.....	47
Tableau 19 - Épaisseur de la couche d'assise en fonction de la portance (matériaux granulaires)	48
Tableau 20 – Coefficient de poisson.....	52
Tableau 21 – Classes de la Plate -forme.....	54
Tableau 22 - Classes du CBR	57
Tableau 23 – Corrélation DCP- CBR.....	59
Tableau 24 – CBR mesuré en laboratoire	60
Tableau 25 - Estimation du CBR selon du type du sol.....	61
Tableau 26 - Classes de la plate-forme	70
Tableau 27 - Caractéristiques des matériaux de structure, G15 et G7.....	70
Tableau 28 - Structures de routes principales	71
Tableau 29 - Structures de routes secondaires	71
Tableau 30 -Perte annuelle de matériaux en fonction du trafic, du site et de la pluviométrie	80
Tableau 31 - Synthèse hypothèses de dimensionnement - Méthodes.....	83

Tableau 32 - Synthèse hypothèses de dimensionnement - Catalogues.....	84
Tableau 33 - Hypothèses pour les exemples d'application des méthodes	94
Tableau 34 – Synthèse hypothèses des méthodes et catalogues utilisés pour l'exemple.....	94

1 Résumé

Résumé en français

Le présent rapport a été élaboré dans le cadre du Projet National DVDC. Il contribue aux travaux réalisés du sous thème PR1-2 Sols supports et chaussées souples du thème 1 du projet national sur les mécanismes de dégradation des chaussées.

Ce document présente une analyse bibliographique des différentes méthodes de dimensionnement des chaussées souples et des routes non revêtues. L'objectif de cet état de l'art au niveau international est de recenser les méthodes existantes et de les analyser avec les deux objectifs suivants :

- ▶ Décrire la qualité de portance des plates-formes ;
- ▶ Décrire la prise en compte des matériaux granulaires (des sous-couches de chaussées) dans le dimensionnement.

La première partie du document décrit la démarche générale de dimensionnement pour la conception des chaussées souples. Différentes méthodes ont été analysées, méthodes empiriques, méthodes rationnelles et quelques catalogues de structures types également.

L'analyse a porté une attention particulière à la prise en compte des caractéristiques du sol support et des matériaux non traités retenues dans les différentes méthodes de dimensionnement.

La deuxième partie du document décrit quatre méthodes concernant la conception des routes non revêtues : méthode de Tanzanie, méthode et catalogue AASHTO, méthode CEBTP et méthode VIZIRET. Cette dernière présente également un système de gestion de l'entretien d'un réseau non revêtu.

Il est également présenté un exemple d'application de huit méthodes (guides et catalogues confondus).

Mots-clés : méthodes internationales, chaussée souple, route non revêtue, modélisation sol, matériaux granulaires

Abstract

Keywords: international design methods, flexible pavement, unpaved road, subgrade, granular materials

2 Introduction

Une recherche biographique a été réalisée pour présenter une synthèse des méthodes de dimensionnement de chaussées souples utilisées à l'international. L'objectif de cette synthèse bibliographique est de regrouper l'ensemble des hypothèses de dimensionnement retenues par ces référentiels pour une meilleure connaissance des pratiques actuelles en terme de dimensionnement des chaussées souples et routes non revêtues. Le but de l'analyse est de mieux connaître certaines hypothèses prises en compte dans les différentes méthodes, notamment les propriétés du sol et des matériaux granulaires.

2.1 Composition du document

Le présent document est structuré de la manière suivante :

- ▶ La première partie de ce rapport bibliographique présente des méthodes de dimensionnement des chaussées souples. Elle comporte la description de deux méthodes empiriques (AASHTO et DMRB) puis elle se concentre sur les méthodes analytiques, et enfin sur les catalogues de structures types.
- ▶ La deuxième partie du rapport est consacrée au dimensionnement et à l'entretien des routes non revêtues.

Les référentiels qui sont présentés ci-après correspondent à des guides et catalogues qui présentent différentes méthodes de dimensionnement de chaussées souples ou non revêtues. Les référentiels analysés sont les suivants :

N°	Méthode	Référence
[1]	Road Note 31	Transport Research Laboratory Road note 31 - A guide to the structural design of bitumen surfaced roads in tropical and sub-tropical countries-1993*
[2]	CEBTP	CEBTP - Guide Pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux - neuf 1984*
[3]	Australienne	AUSTROADS part 2 2012*
[4]	Américaine	AASHTO guide for design of pavements structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993 (and 1998 for rigid pavement)
[5]	Anglaise	DMRB Design Manual for Roads and Bridges – Highways Agency, Volume 7, Section 2, Part 3 – HD 26/06, + Part 1 – Traffic Assessment - HD 24/06, February 2006.
[6]	Algérienne	Catalogue de Dimensionnement des Chaussées Neuves de l'Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics (CTTP) Algérie 2000
[7]	Française	Norme Française NF P 98-086, Dimensionnement structurel des chaussées routières 2019
[8]	Sud-africaine	Afrique du Sud SATCC – July 2001 – Code of Practice for the Design of Road pavements – draft*
[9]	Tanzanienne	Tanzanie – pavement and materials design manual – 1999*
[10]	Viziret	Viziret qualification et quantification des dégradations d'une route non revêtue pour la programmation et le suivi des travaux d'entretien – Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées n°213 1998.
[11]	Espagnole	Catalogue de structure de chaussée espagnol – norma 6.1 IC secciones de formas*
[12]	Sénégalaise	Catalogue de structures de chaussées neuves et Guide de dimensionnement des chaussées au Sénégal - 2015
[18]	Canadienne	Dimensionnement structurel des chaussées souples au MTQ logiciel Chaussée 2, Service des chaussées Ministère des Transports du Québec - 2018
[19]	Brésilienne	Manual de Pavimentação, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) -2006
[20]	Allemande	Guidelines for the standardisation of pavement structures of traffic areas R1 – RstO 12; Edition 2012/Translation 2015
[21]	Japonaise	Handbook for Asphalt Pavement – Japan Road Association, 2019
[22]	Belge	Code de bonne pratique pour le dimensionnement des chaussées à revêtement hydrocarboné – Recommandations CRR – R 49/83

Tableau 1 Liste des documents de référence

* Ces catalogues proposent des structures types sans expliciter la méthode de calcul exacte.

2.2 Constitution d'une chaussée : terminologie

Les structures de chaussée sont constituées de plusieurs couches comme l'indique la Figure 1 ci-dessous.

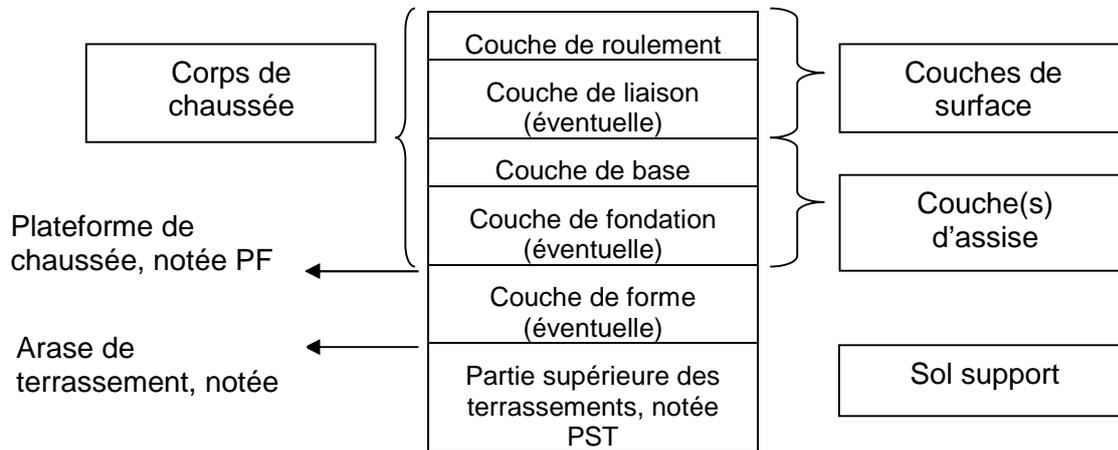


Figure 1 - Constitution d'une structure de chaussée

Les fonctions des éléments de la chaussée sont listées ci-après :

La **couche de roulement** a pour fonction d'assurer l'étanchéité et les propriétés d'usage conformes aux objectifs recherchés (adhérence, bruit, uni, etc.) pour la sécurité et le confort d'utilisateur. Elle protège l'assise des agressions directes du trafic et du climat. Elle assure également l'imperméabilisation de la chaussée. Le matériau utilisé doit résister au fluage par déformation viscoplastique ainsi qu'au poinçonnement statique et au vieillissement dû aux agents atmosphériques.

La **couche de liaison** conduit à limiter l'épaisseur de la couche de roulement, limitant ainsi le recours à des granulats d'excellente qualité à la seule couche de roulement. La couche de liaison peut être réalisée avec des exigences moindres. Par ailleurs, lorsque le trafic est élevé, la couche de liaison est recommandée pour améliorer la qualité de l'uni longitudinal et la qualité de réalisation des couches de surface épaisses pour assurer la transition entre la couche de roulement mince ou très mince et l'assise de la structure. À contrario, si le trafic est moins important, on se limitera à la seule couche de roulement pour éviter d'ajouter une interface, très exposée vue sa position dans la structure.

L'**assise des chaussées** est généralement constituée de deux couches : la **couche de fondation** et la **couche de base**, elles doivent assurer les fonctions suivantes :

- ▶ lors de la construction de la chaussée : fournir un support bien nivelé, fournir un support de portance et servir de couche de roulement provisoire ;
- ▶ lorsque la chaussée est construite : assurer la protection thermique de la plateforme et apporter à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic.

La **plateforme** (arase et PST avec ou sans couche de forme) correspond à la surface de la couche de forme supportant les couches de chaussée. Elle doit présenter :

- ▶ à court terme, pour la construction, un niveau de traficabilité qui permette la circulation des engins de chantier, un nivellement qui assure la régularité des épaisseurs prescrites pour les couches d'assise, un niveau de déformabilité qui autorise le compactage de celles-ci et une protection du sol support contre les intempéries.
- ▶ à long terme, une portance minimale homogène pour assurer le bon fonctionnement de la chaussée en service.

Une **couche de réglage** fin en matériau granulaire d'une dizaine de centimètre d'épaisseur dans la plupart des cas, est parfois indispensable pour respecter les exigences de nivellement de la plateforme.

L'arase des terrassements correspond à la partie supérieure des terrassements (PST) : sol terrassé (déblai ou remblai, sol en place ou rapporté).

3 Méthodes de dimensionnement des chaussées souples

3.1 Périmètre de l'étude

Le paragraphe 3.1.6 de la norme française NF P98-086 - Dimensionnement structural des chaussées routières [7] définit les chaussées souples comme : 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.

Dans la présente étude bibliographique seront étudiées des structures pouvant comporter une couche de matériaux bitumineux plus importante, le critère de 12 cm n'étant pas défini dans les méthodes étrangères.

À titre d'exemple, la méthode AASHTO distingue le dimensionnement de « flexible pavement » et de « rigide pavement ». Dans la présente étude le dimensionnement décrit dans le chapitre « flexible pavements » qui correspond aux chaussées bitumineuses sera analysé.

Les structures semi-rigides et en béton n'ont pas été analysées dans le cadre de la présente étude.

3.2 Les différents types de dimensionnement

En matière de méthode de dimensionnement des chaussées, on distingue deux grandes tendances : l'approche empirique d'une part, et l'approche rationnelle d'autre part.

Les **méthodes empiriques** de dimensionnement font appel exclusivement à des expériences acquises comparant le comportement à long terme de diverses structures pour différentes conditions climatiques et de trafic. Des essais en vraie grandeur apportent également de nombreuses informations nécessaires pour la mise en place des règles empiriques de dimensionnement. Les méthodes américaine (AASHTO), anglaise (DMRB) et suisse de dimensionnement des structures de chaussées sont des méthodes empiriques.

Les **méthodes rationnelles** sont aujourd'hui les plus répandues : elles sont basées d'une part sur une modélisation de la chaussée par un massif multicouche, constitué de couches infinies dans le plan, reposant sur un sol support semi-infini en profondeur.

Chaque couche est composée d'un matériau homogène, à comportement isotrope et élastique linéaire. Le modèle est soumis en surface à des charges statiques circulaires, verticales et uniformes représentant les sollicitations exercées par les pneumatiques sur la chaussée. En dépit de ces simplifications en comparaison au comportement réel et complexe des chaussées, ce modèle permet une évaluation considérée comme réaliste des sollicitations mécaniques créées par ces charges au sein de la structure.

Ces méthodes dites rationnelles sont basées d'autre part sur la détermination des sollicitations mécaniques admissibles par les différents matériaux constitutifs de la chaussée à dimensionner. Les valeurs admissibles doivent être supérieures aux sollicitations calculées par le modèle théorique précédent, afin de se protéger des dégradations par endommagement de fatigue (cas des matériaux traités) ou par déformations plastiques excessives (cas des matériaux non traités et des sols) sur la période de calcul choisie. L'évaluation de ces sollicitations admissibles repose sur la caractérisation du comportement des matériaux par des essais de fatigue en laboratoire (matériaux traités) ou sur des règles empiriques (matériaux non traités et sols).

Les méthodes de dimensionnement française, australienne, sud-africaine sont des méthodes de dimensionnement rationnelles.

Il existe également des **catalogues de dimensionnement**, dont les structures sont en général pré calculées par classe de trafic. Il s'agit de déterminer alors seulement la structure, avec en données d'entrée le trafic et la portance de la plate-forme. La présente étude expose le

catalogue espagnol, la Road Note 31 et le Catalogue Sénégalais pour les chaussées souples et le catalogue de Tanzanie pour les routes non revêtues.

3.3 Les méthodes empiriques

Dans ce chapitre deux méthodes de nature empirique, c'est à dire tirée d'observation, sont présentées. Il s'agit des méthodes AASHTO et DMRB. Ces méthodes ont l'avantage de pouvoir observer la dégradation concrète d'une chaussée sur la section réelle. Cependant ces méthodes empiriques, ont également quelques inconvénients:

- ▶ Le coût est très élevé pour avoir un nombre important de sections expérimentales afin de déterminer les épaisseurs des différentes couches et les propriétés mécaniques des matériaux ;
- ▶ Le temps de réponse est très long ;
- ▶ Ces méthodes donnent des résultats qui ne peuvent être généralisés car elles ne s'appliquent qu'aux matériaux étudiés, qu'aux conditions d'environnement de l'expérimentation et qu'aux sols supports rencontrés.

On peut cependant noter que la méthode AASHTO est largement utilisée dans le monde. Des nombreux pays ont élaboré leur propre méthode sur les bases de la méthode américaine, avec des adaptations selon les matériaux locaux et le climat du pays.

3.3.1 Méthode AASHTO

La méthode américaine est basée sur une **analyse empirique** des résultats des essais AASHO qui se sont déroulés entre 1957 et 1961.

Le dimensionnement se fait à l'aide d'équation de régression aussi bien pour les chaussées souples que rigides.

L'avantage principal de cette méthode est qu'il s'agit d'une méthode directe, simple à utiliser. Le guide AASHTO fournit en plus des équations, des graphiques qui facilitent énormément la procédure de dimensionnement des chaussées.

L'équation exprime la durée de vie en nombre d'essieux équivalents admissibles (W18) avant une perte de qualité préalablement définie (PSI). L'essieu équivalent est un essieu simple à roue jumelées de 8,2 t (18 kip). Les caractéristiques de la chaussée qui entrent en jeu sont le nombre structural (SN), qui représente la nature et l'épaisseur structurelle de la chaussée et le module reversible (MR) correspondant la raideur du sol qui la supporte. Le comportement des chaussées est en réalité bien plus complexe et fait intervenir d'autres facteurs. Il existe ainsi une certaine dispersion, correspondant à une erreur standard (S0), sur la durée de vie réelle dans chaque cas. Pour en tenir compte, l'équation se calcule alors selon le mode probabiliste et fait intervenir un multiple (ZR) de cette erreur qui dépend du degré de risque de calcul que l'utilisateur est prêt à accepter.

Le dimensionnement sera jugé adéquat lorsque cette durée de vie en nombre d'essieux standard ESAL sera égale ou supérieure au nombre de passages prévus de l'essieu de référence durant la durée de service de la chaussée.

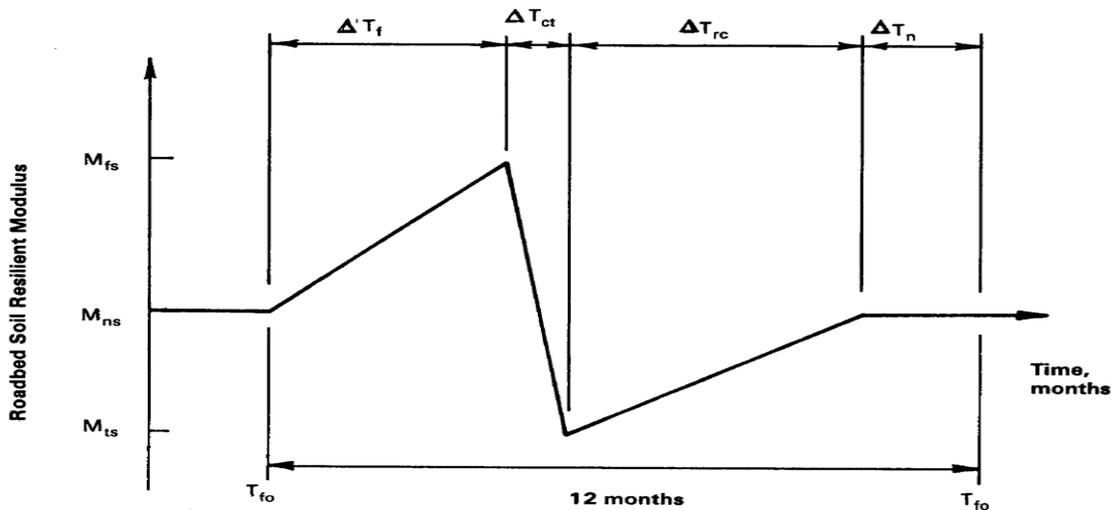
La formule qui relie le trafic, les facteurs de fiabilité, l'index de qualité de la route, le sol support et le nombre structurel est :

$$\text{Log}(W_{18}) = Z_a \times S_0 + 9,36 \times \text{log}(SN+1) - 0,20 + \frac{\text{log} \left[\frac{\Delta \text{PSI}}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} - 2,32 \times \text{log}(MR) - 8,07$$

Prise en compte du sol

Le module élastique du sol support M_R ou module réversible (exprimé en MPa) est le paramètre fondamental qui quantifie la raideur d'un sol. Cette caractéristique peut changer au cours des différentes saisons de l'année. En déterminant la valeur M_R il convient de prendre en compte l'effet d'affaiblissement dû au dégel du printemps.

La figure suivante montre la variation du module durant une année :



- M_{fs} = Frozen roadbed modulus
- M_{ns} = Normal roadbed modulus
- M_{ts} = Thaw (reduced) roadbed modulus = $r_t \times M_{ns}$
- r_t = Thaw reduction factor
- T_{fo} = Month freeze started
- ΔT_f = Time of freeze
- ΔT_{ct} = Time of critical thaw
- ΔT_{rc} = Time of thaw recovery
- ΔT_n = Time-normal roadbed condition

Figure 2 - Variation annuelle de la valeur de M_R selon le Guide AASHTO

Pour déterminer le module élastique des matériaux de la plate-forme, il convient de réaliser un essai en laboratoire conformément à la norme AASHTO T 274. L'essai doit être effectué dans les mêmes conditions de contrainte et d'humidité que lors de la saison de référence.

L'autre façon de déterminer le M_R effectif consiste à utiliser l'effet combiné de toutes les valeurs de module de résilience saisonnières en suivant la procédure décrite à la page II-13 du Guide AASHTO -1993. Cette valeur est une valeur moyenne afin de compenser les effets d'affaiblissement du dégel sur les performances de la chaussée.

Le module élastique effectif du sol de la chaussée doit être déterminé en utilisant la relation entre le M_R et la valeur CBR donnée dans le Guide 4, Chapitre 1, § 1.5, page I-13 : M_R (psi) = 1 500 x CBR. Le tableau suivant indique autres formules qui peuvent être utilisées pour estimer le M_R .

Les équations suivantes peuvent être utilisées pour estimer le MR:

Tableau 1
Modèles reliant les indices et les propriétés de résistance de certains matériaux au module réversible M_r

Strength/Index Property	Model	Comments	Test Standard
CBR	$M_r = 2555(\text{CBR})^{0.64}$	CBR = California Bearing Ratio, percent	AASHTO T193—The California Bearing Ratio
R-value	$M_r = 1155 + 555R$	R = R-value	AASHTO T190—Resistance R-Value and Expansion Pressure of Compacted Soils
AASHTO layer coefficient	$M_r = 30000 \left(\frac{a_i}{0.14} \right)$	a_i = AASHTO layer coefficient	AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures (1993)
PI and gradation [®]	$\text{CBR} = \frac{75}{1 + 0.728(\text{wPI})}$	wPI = P200*PI P200= percent passing No. 200 sieve size PI = plasticity index, percent	AASHTO T27—Sieve Analysis of Coarse and Fine Aggregates AASHTO T90—Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils
DCP [*]	$\text{CBR} = \frac{292}{\text{DCP}^{1.12}}$	CBR = California Bearing Ratio, percent DCP = DCP index, in/blow	ASTM D6951—Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications

[®]Estimates of CBR are used to estimate M_r .

Source : AASHTO (2002).

Tableau 2 – Modèles pour déterminer la valeur M_R

Ces formules sont basées sur des relations empiriques et doivent donc être utilisés avec précaution.

Ces équations donnent des valeurs de portance légèrement différentes. À titre indicative pour une valeur de CBR égale à 8, les valeurs M_R sont les suivants :

- ▶ La formule donnée dans le Guide AASHTO Chapitre 1, § 1.5, page I-13, établie par Heukelom et Klomp (1960), pour sol fins avec un CBR ≤ 10

$$M_R \text{ (psi)} = 1\,500 \times \text{CBR} = 1\,500 \times 8 = 12\,000 \text{ psi (82 MPa)}$$

- ▶ La formule donnée, par le The Transportation and Road Research Laboratory (TRRL) DMRB volume 7.:

$$M_R \text{ (psi)} = 2\,555 \times \text{CBR}^{0.64} = 2\,555 \times 8^{0.64} = 9\,668 \text{ psi (67 MPa)}$$

En raison de cette différence, il est recommandé de réaliser un nombre important de tests CBR. L'évaluation de l'état actuel du sol est primordiale pour obtenir les performances réelles de la structure de la chaussée.

Prise en compte des matériaux granulaires

Le **SN = nombre structurel** correspondant à la nature et à l'épaisseur effective de la structure de la chaussée dont on évalue la portance, c'est la somme pondérée des épaisseurs D_i des différentes couches. Le coefficient pondéral de chaque couche dépend de la nature des matériaux a_i et des conditions de drainage de la couche m_i .

$$\text{SN} = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

- ▶ a_1, a_2, a_3 coefficients structuraux correspondant respectivement aux couches de surface, base, fondation, respectivement des modules E_{AC}, E_{BS}, E_{SB} ;
- ▶ D_1, D_2, D_3 épaisseur (inches) (arrondi au nb entier) des couches de surface, base et fondation ;

- ▶ m2,m3 coefficient de drainage des couches de base et fondation (pour les couches non liées) dont la portance est modifiée par la présence d'eau de ruissellement ou provenant de la nappe phréatique. Il a pour fonction de corriger les coefficients structuraux en vue de tenir compte de la capacité des couches à drainer l'eau. Le coefficient de drainage varie donc suivant la perméabilité du matériau, la porosité effective, les pentes et les distances à drainer ainsi que l'épaisseur des couches. Son choix est basé sur le temps nécessaire pour drainer de l'eau libre dans la fondation et la sous-fondation.

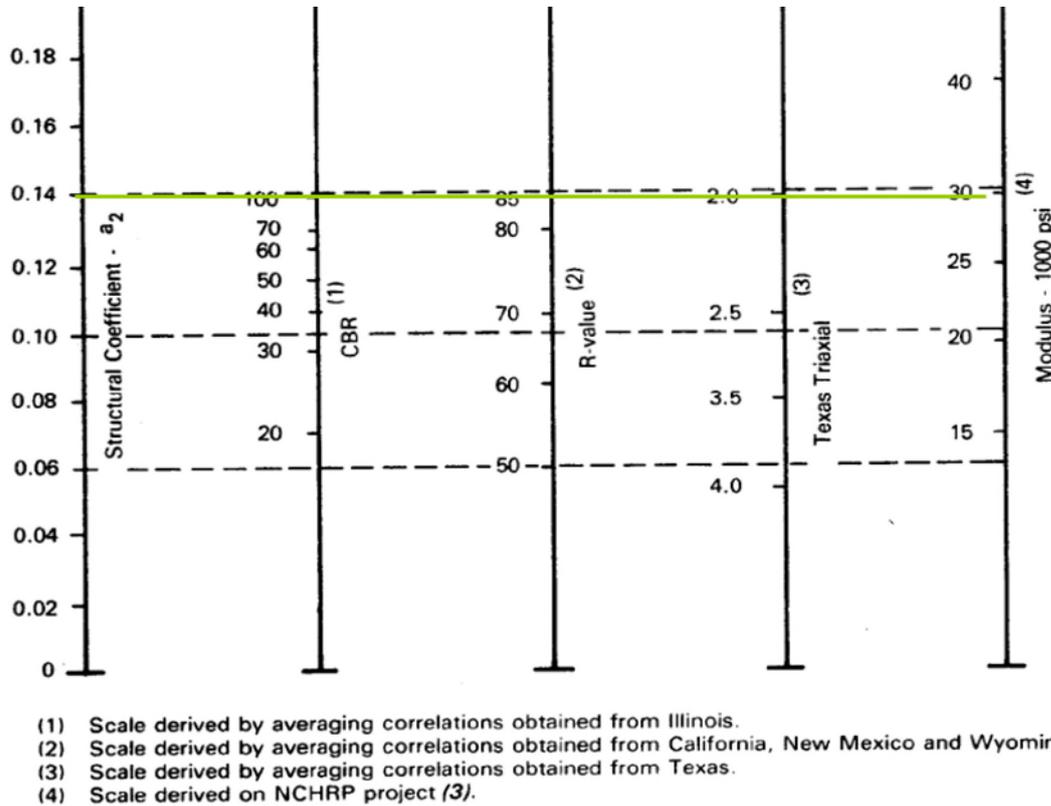


Figure 3 – Détermination de la coefficient a2 - couche de base, selon le guide AASHTO

En générale le coefficient a2 pris en compte dans le dimensionnement est égal à 0.14, qui correspond à une valeur de CBR = 100% et un module de 30 000 psi (210 MPa).

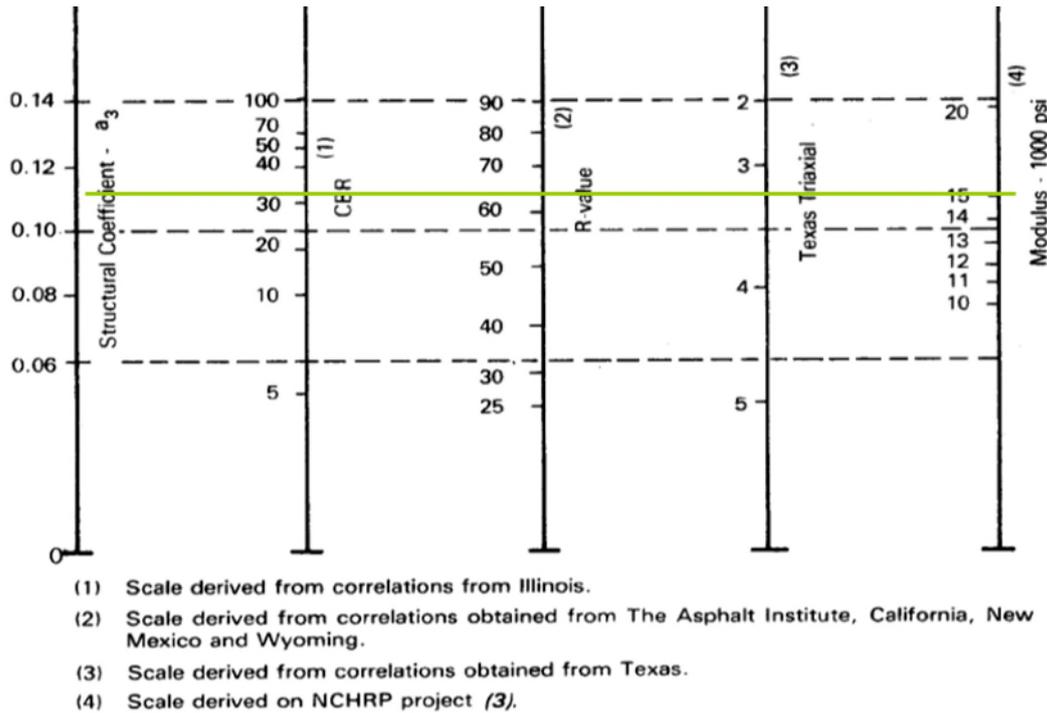


Figure 4 – Détermination de la coefficient a3 - couche de fondation, guide AASHTO

En général, le coefficient a3 pris en compte dans le dimensionnement est égal à 0.11, qui correspond à une valeur de CBR = 30% et un module de 20 000 psi (100 MPa).

Les valeur a2 et a3 sont à choisir selon les caractéristiques des matériaux disponibles.

Les deux figures présentées ci-avant sont issues des essais AASHTO, qui sont réalisés sur des sections très courtes où la qualité de la construction et des matériaux a été bien contrôlée.

Néanmoins, une grande variabilité dans la qualité de construction et la qualité des matériaux employés est constatée dans tous les projets routiers. Par conséquent, le comportement mécanique de la chaussée est variable tout le long du tracé. Les variations de comportements se traduisent souvent par l'apparition de dégradations localisées. L'utilisation de valeurs moyennes des caractéristiques, lors de la conception, se traduira généralement par l'apparition de dégradations localisées, avant même que l'indice de viabilité final moyen du projet ne soit atteint. Il faut alors penser à choisir une fiabilité plus grande pour le projet.

Coefficient de drainage

Pour déterminer l'épaisseur nécessaire de chaque couche de chaussée, la méthode AASHTO utilise le coefficient de drainage m_i pour les couches de base et fondation (pour les couches non liées) dont la portance est modifiée par la présence d'eau de ruissellement ou provenant de la nappe phréatique. Il a pour fonction de corriger les coefficients structuraux en vue de tenir compte de la capacité des couches à drainer l'eau. Le coefficient de drainage varie donc suivant la perméabilité du matériau, la porosité effective, les pentes et les distances à drainer ainsi que l'épaisseur des couches. Son choix est basé sur le temps nécessaire pour drainer 50% de l'eau libre dans la fondation et la sous-fondation.

Le guide AASHTO combine l'utilisation des deux tableaux suivants pour déterminer la valeur m_i . La qualité du drainage est à déterminer selon l'importance de la route à dimensionner et la zone climatique du projet.

Qualité du drainage	Temps nécessaire pour drainer l'eau
Excellente	2 heures
Bonne	1 jour
Moyenne	1 semaine
Mauvaise	1 mois
Très mauvaise	Plus que 1 mois

Tableau 3 - Qualité du drainage selon le guide AASHTO

Le tableau suivant propose les valeurs de drainage m_i pour les chaussées souples selon le pourcentage de temps pendant lequel la structure de la chaussée serait normalement exposée à des niveaux d'humidité approchant de la saturation, conformément au tableau 2.4 du guide AASHTO.

Qualité du drainage	Pourcentage du temps quand la chaussées est exposée à un niveau hydrique proche de la saturation			
	< 1%	1-5%	5-25%	> 25%
Excellente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bonne	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Moyenne	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Mauvaise	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Très mauvaise	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.60

Tableau 4 - Valeurs de drainage m_i selon le guide AASHTO

Par exemple, la valeur de $m_i = 1$ ne signifie pas la même chose dans un environnement plutôt sec (moins de 18 jours de saturation) que dans une région où cette situation est plus courante (plus de 91 jours de saturation). Dans le premier cas, cette valeur correspond à un mauvais niveau de drainage (eau retirée dans un mois) et dans le second cas, à un bon niveau de drainage, où l'eau est éliminée en une journée.

Pour obtenir le même SN avec un coefficient de drainage plus faible, il est nécessaire d'augmenter l'épaisseur du revêtement. Si la qualité du drainage est surestimée, la structure de la chaussée peut être sous-dimensionnée, ce qui signifie que des dommages prématurés peuvent apparaître sur la structure de la chaussée.

3.3.2 Déclinaisons de la méthode AASHTO

Au Brésil

Le Manual de Pavimentação, édité par le Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) en 2006 présente la méthode brésilienne de dimensionnement de chaussées [19].

La base de la méthode est l'AASHTO, le dimensionnement détermine l'épaisseur nécessaire de la chaussée en fonction du trafic (exprimé en essieu de référence de 8,2 tonnes) et en fonction de la valeur CBR du sol à l'aide du graphique suivant (figure 5 ci-dessous).

Pour déterminer le trafic de dimensionnement, la méthode retient un facteur climatique régional (FR). Ce facteur prend en compte les différents états d'humidité des matériaux pendant une année. Il varie de 0.2 (période très sèche) à 5 (matériaux quasi saturés) selon les résultats obtenus sur les pistes expérimentales AASHTO. La valeur retenue est une moyenne pondérée en fonction de la période de l'année et de la durée des pluies.

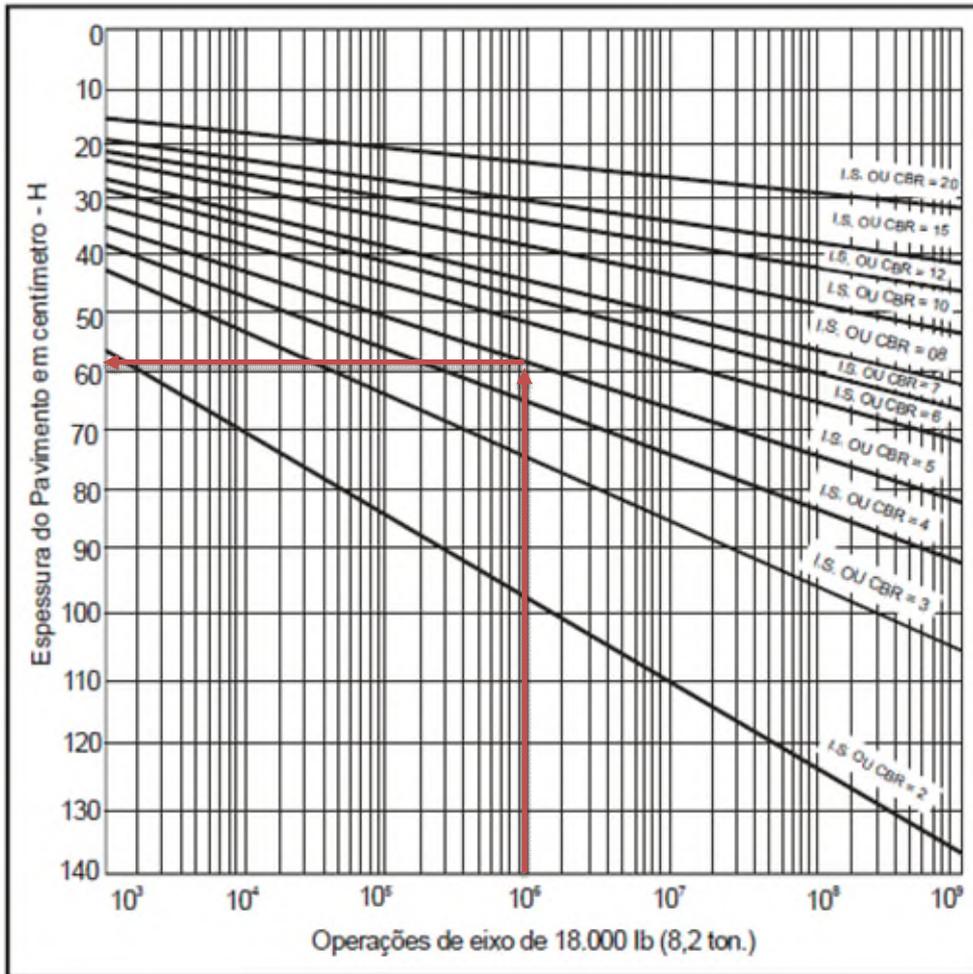


Figure 5 – Détermination de l'épaisseur de la chaussée

$$H_t = 77,67 \cdot N^{0,0482} \cdot CBR^{-0,598}$$

Par exemple, pour un trafic cumulé de 1 million PL, sur un sol support avec un CBR de 5% l'épaisseur nécessaire est d'environ 60 cm. Cette épaisseur est décomposée ensuite en couche de roulement, couche de base et couche de fondation à l'aide du graphique suivant et des coefficients d'équivalence, présentés dans le tableau 5 :

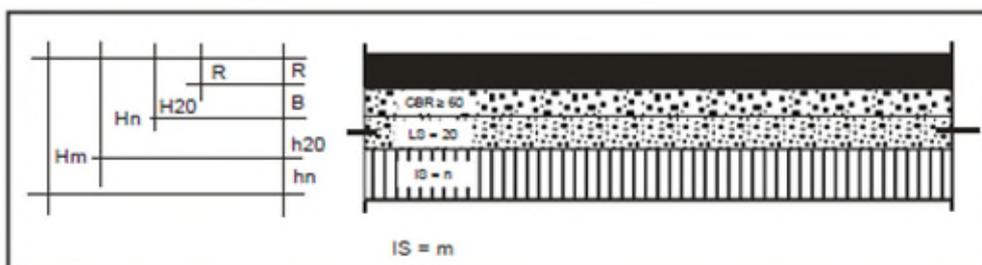


Figure 6 – Dimensionnement de la chaussée

Componentes do pavimento	Coefficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Tableau 5 - Coefficients d'équivalence selon la méthode brésilienne

L'épaisseur minimale de la couche de roulement est donnée en fonction du trafic cumulé :

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Tableau 6 - Épaisseur minimale pour la couche de roulement en fonction du N

La valeur minimale pour le CBR est :

- ▶ 60% pour la couche de base granulaire et
- ▶ 20% pour la couche de fondation.

Au Canada

Selon un sondage effectué par le FHWA (Federal Highway Administration) 80% des états américains et 70% des provinces canadiennes utilisent la méthode AASHTO.



Figure 7 – Utilisation de la méthode AASHTO, sondage 2007

La méthode utilisée au Canada est basée sur AASHTO [18]. La méthode de base du Guide de 1993 est complétée avec quelques coefficients structuraux (a_1) plus performants, qui ont été introduits de façon à reproduire l'effet du calcul mécanisto-empirique. À cause du comportement thermoélastique du bitume le comportement des matériaux bitumineux dépend de la température. Au Canada deux zones climatiques sont distinguées avec deux températures effectives du revêtement (T_{BB}). La température effective typique est de 20,5°C pour la zone sud et de 17,5°C pour la zone nord. Le coefficient structural est à retenir en fonction de cette température (0,43-0,44 pour la zone sur et 0,47-0,48 pour la zone nord). Ces valeurs ont été vérifiées avec des essais en laboratoire également (détermination du module complexe des enrobés, selon la norme LC 26-700).

La vérification au gel est calculée à plusieurs niveaux:

- ▶ Protection partielle avec l'utilisation de l'abaque 1994, voir la Figure 8 ci-dessous ;

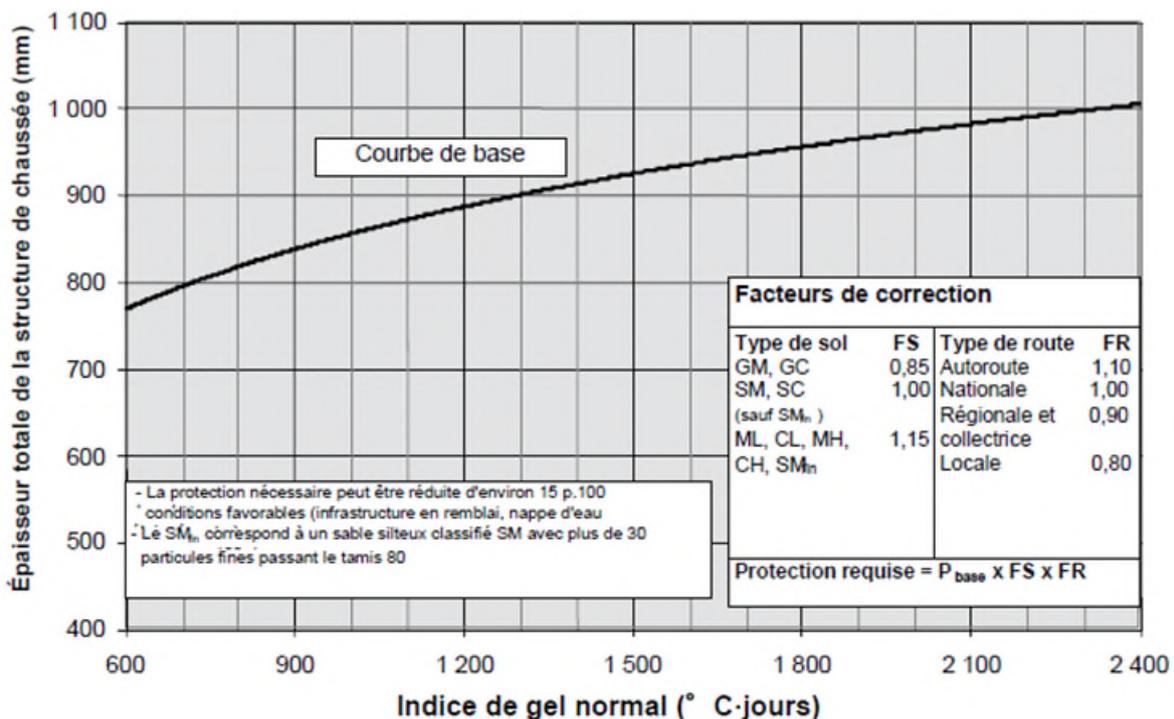


Figure 8 – Protection contre le gel au Canada

La protection partielle définit l'épaisseur minimale de la chaussée, qui est déterminée en fonction de l'indice de gel normal avec l'utilisation des deux facteurs de correction (en fonction du type du sol et le type de la route). Cette approche est basée sur la connaissance du comportement des chaussées au Québec.

La méthode définit également la profondeur de transition P, qui est l'épaisseur maximale selon le tableau suivant :

Indice de gel normal (°C jours)	Profondeur de transition « P » (m)		
	Autoroute et nationale	Régionale et collectrice	Locale
< 1200	2,0	1,8	1,6
1200 - 1700	2,25	2,0	1,8
> 1700	2,5	2,25	2,0

Tableau 6 - Profondeur P

- ▶ Protection à soulèvement contrôlé (amélioration de la protection partielle) ;

Cette protection s'ajoute à la méthode de 1994 en prenant en compte la gélivité des sols et les conditions hydriques. L'épaisseur de la couche de sous-fondation est déterminée selon la classe de l'indice de gel de référence (< 1200, entre 1200 et 1700, > 1700 °C x jours), le type du sol et la classe de la route. Cette méthode prend en compte les sols hétérogènes, les sols argileux humides avec IL > 0,9. Les épaisseurs de la sous-fondation granulaire sont données dans le Tableau 7

Tome
II

Chapitre
2

Page
4

Date
2010 10 30

STRUCTURES DE CHAUSSÉE

Transports Québec

NORME

Tableau 2.5-1
Épaisseur de sous-fondation en granulats naturels ou recyclés (MR) MG 112, chaussées souples où le DJMA projeté est inférieur à 5000

Sol d'infrastructure ¹⁾	Classification de la route (DJMA projeté < 5000)	Indice de gel normal ²⁾		
		moyen	élevé	très élevé
		Épaisseur de sous-fondation ³⁾ (mm)		
Constitué de moins de 20% de particules fines passant le tamis 80µm	Locale	300-400	300-425	300-450
	Collectrice et régionale	300-425	300-475	300-525
	Nationale	300-450	300-525	300-600
GM, GC	Locale	300-400	300-475	300-650
	Collectrice et régionale	300-450	375-650	375-750
	Nationale	375-475	375-700	375-825
SM, SC (sauf SM fin) ⁴⁾	Locale	375-525	375-550	450-700
	Collectrice et régionale	375-525	450-700	450-850
	Nationale	450-600	525-750	525-950
SM fin, croûte argileuse, MH, CH ou CL avec $I_p > 12$	Locale	450-750	500-850	600-1050
	Collectrice et régionale	525-850	600-1000	700-1100
	Nationale	600-950	700-1100	800-1200 (325 + 25i + 400)
CL avec $I_p < 12$	Toutes classes	900	1100 (350 + 25i + 350)	1300 (575 + 25i + 400)
ML, ML-CL	Toutes classes	1150 (450 + 25i + 300)	1400 (400 + 38i + 350)	1600 (375 + 50i + 400)
Argiles varvéées ou sensibles ($I_p > 0,9$)	Toutes classes	1400 (600 + 25i + 300)	1700 (600 + 38i + 350)	1950 (550 + 50i + 400)

Tableau 7 - Épaisseur de la sous-couche granulaire [18]

Au Japon

Depuis 1967, la méthode de dimensionnement japonaise [18] est basée sur la méthode AASHTO. En 1992, une méthode basée sur la théorie de l'élasticité, en considérant la chaussée comme un modèle multicouche, a été développée en complément à la méthode empirique, même si la méthode AASHTO reste très répandue.

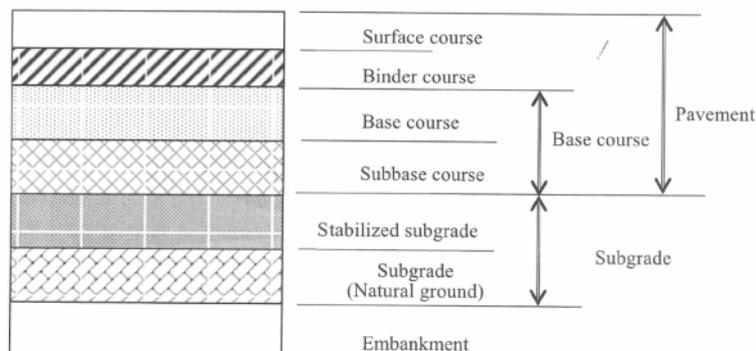


Figure 2-1 Components of asphalt pavement and their names

Figure 9 - Schéma de la structure de chaussées - Méthode Japonaise

La prise en compte du trafic est faite sur une période de dimensionnement de 10 ans, pour laquelle des classes de trafic sont définies :

The number of wheel loads inducing fatigue failure refers to the number of 49kN wheel loads that are repeatedly exerted on a paved road surface until cracking caused by fatigue failure first occurs on the pavement. This number is specified separately for each section in which each layer is made of the same material with the same thickness. Table 2-5 lists reference values for the number of wheel loads inducing fatigue failure.

Table 2-5 Reference values for the number of wheel loads inducing fatigue failure

Traffic volume class	Designed daily volume for pavement (Unit: vehicles/day per direction)	Number of wheel loads inducing fatigue failure (Unit: times/10 years)
N ₇	3,000 or more	35,000,000
N ₆	1,000 - 2,999	7,000,000
N ₅	250 - 999	1,000,000 /
N ₄	100 - 249	150,000
N ₃	40 - 99	30,000
N ₂	15 - 39	7,000
N ₁	0 - 14	1,500

Tableau 8 - TMJA et nombre d'essieux standards sur une période de dimensionnement de 10 ans

Si la période de dimensionnement est différente de 10 ans, le trafic doit être convertie en termes de 10 ans.

Tel que la méthode AASHTO, la méthode japonaise est basée sur le CBR des matériaux utilisés en couche de forme à partir duquel l'épaisseur total de la chaussées est déterminée, en prenant en compte le niveau de service souhaité (avec le risque de dimensionnement de 10%, 25% et 50%) :

$$\text{For 90\% reliability : } T_A = \frac{3.84N^{0.16}}{CBR^{0.3}}$$

$$\text{For 75\% reliability : } T_A = \frac{3.43N^{0.16}}{CBR^{0.3}}$$

$$\text{For 50\% reliability : } T_A = \frac{3.07N^{0.16}}{CBR^{0.3}}$$

where T_A : Required equivalent thickness (cm),
 N : Number of wheel loads inducing fatigue failure (times), and
 CBR : Design CBR of the subgrade (%).

Figure 10 - Équation pour le calcul de l'épaisseur totale de la structure

Afin de prendre en compte les dégradations provoquées par les cycles de gel/dégel, la méthode japonaise prévoit une couche de protection au gel « Frost blanket ». La profondeur de pénétration du gel est calculée et comparée à l'épaisseur de pénétration du gel maximale de référence. La profondeur de référence est traduite par l'épaisseur maximale de gel qui s'est produite dans les dix dernières années, en considérant un sol constitué de matériaux granulaires homogènes résistants au gel. La profondeur de pénétration du gel est calculée au travers de l'équation suivante :

$$Z = C\sqrt{F}$$

where Z : Frost penetration depth (cm),
 C : Constant, and
 F : Freezing index ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$).

La constante C dépend des conditions d'humidité et densité du sol, de la température du support avant et après le gel. La constante C est également affectée par l'indice de gel F ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour}$).

L'abaque suivant présente la corrélation, entre la profondeur de protection au gel et l'indice de gel d'un matériaux homogène, granulaire, présentant une bonne résistance au gel, tel qu'un sable ou une grave non traitée :

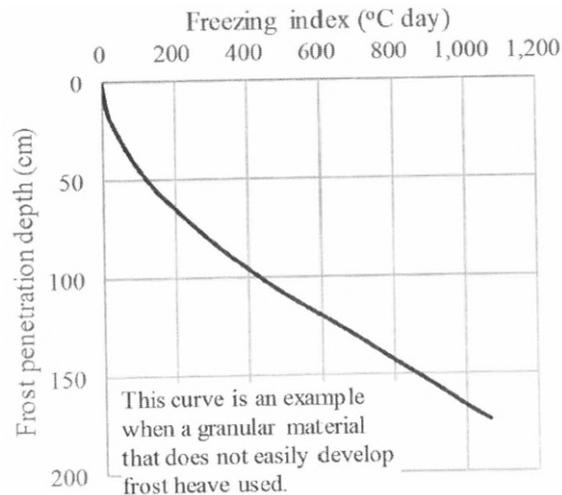


Figure 11 - Corrélation entre indice de gel et épaisseur de protection au gel

En fonction du type de matériau, des épaisseurs minimales sont préconisées dans la méthode. Les matériaux utilisés en couche de base (en fonction du trafic) sont présentées dans les tableaux suivants :

**Table 2-9 Minimum thickness of each layer of the base course
(designed daily volume for pavement: 40 or more vehicles/day per direction)**

Construction method and material	Minimum thickness per layer
Bituminous stabilization (hot mixing)	2 times the maximum grain size and 5 cm
Other base course materials	3 times the maximum grain size and 10 cm

**Table 2-10 Minimum thickness of each layer of the base course
(designed daily volume for pavement: Less than 40 vehicles/day per direction)**

Construction method and material	Minimum thickness per layer
Crushed stone for mechanical stabilization and crusher-run	7 cm
Bituminous stabilization (cold mixing)	7 cm
Bituminous stabilization (hot mixing)	5 cm
Cement and bituminous stabilization	7 cm
Cement stabilization	12 cm
Lime stabilization	10 cm

Tableau 9 - Épaisseurs minimales pour la couche de base en fonction du trafic et du matériau

Une fois l'épaisseur totale calculée, l'épaisseur de chaque couche est déterminée par l'application de coefficients (α) attribués à chaque matériau (utilisé en assise et en couche de surface) :

Relevant pavement course	Material and construction method	Quality standards	Equivalent conversion factor a
Surface and binder courses	Hot asphalt mixture	Straight asphalt is used. The properties of the mixture are listed in Table 2-12.	1.00
		Hot mixing: Stability of 3.43 kN or more	0.80
Base course	Bituminous stabilization	Cold mixing: Stability of 2.45 kN or more	0.55
		Unconfined compressive strength [7 days]: 1.5 to 2.9 MPa Primary displacement magnitude [7 days]: 5 to 30 1/100 cm Residual strength rate [7 days]: 65% or more	0.65
	Cement and bituminous stabilization	Unconfined compressive strength [7 days]: 2.9 MPa	0.55
	Cement stabilization	Unconfined compressive strength [10 days]: 0.98 MPa	0.45
	Lime stabilization	Unconfined compressive strength [10 days]: 0.98 MPa	0.45
	Crushed stone for mechanical stabilization and mechanically stabilized steel slag	Modified CBR: 80 or more	0.35
	Hydraulic-mechanically stabilized steel slag	Modified CBR: 80 or more Unconfined compressive strength [14 days]: 1.2 MPa	0.55
Subbase course	Crusher-run, steel slag, sand, etc.	Modified CBR: 30 or more	0.25
		Modified CBR: 20 or more but lower than 30	0.20
	Cement stabilization	Uniaxial compressive strength [7 days]: 0.98 MPa	0.25
	Lime stabilization	Uniaxial compressive strength [7 days]: 0.7 MPa	0.25

[Note]

- When using modified asphalt in hot asphalt mixtures for the surface and binder courses, set appropriate coefficient of layer equivalency for their strengths.
- Stability refers to the stability (kN) obtained by the Marshall stability test. This test is performed by using a circular loading head to apply a load at a speed of 50 ± 5 mm/min at $60 \pm 1^\circ\text{C}$ to a cylindrical specimen 63.5 ± 1.3 mm in height formed with a mold 101.6 mm in diameter.
- Unconfined compressive strength refers to the strength (MPa) obtained by a unconfined compressive test that is performed to determine the amount of stabilizer to be added to the relevant stabilization material. The periods in brackets [] are the curing periods of the relevant specimens. Test conditions differ among cement stabilization, lime soil stabilization, and cement and bituminous stabilization. For details, refer to the test method.
- The primary displacement magnitude refers to the displacement magnitude (1/100 cm) that occurs under the unconfined compressive strength obtained by a unconfined compression test that is performed to determine the design of the mixture of the relevant base course material for cement and bituminous stabilization. This test is performed by applying a load at a speed of 1 mm/min to a cylindrical specimen 68.0 ± 1.3 mm in height formed with a mold 101.6 mm in diameter.
- The residual strength rate is the ratio of a specific strength of a specimen to its unconfined compressive strength. The specific strength refers to the strength that occurs when the specimen produces the same magnitude of displacement as the primary displacement magnitude in further compression applied after it has reached the state corresponding to the primary compressive strength.
- The modified CBR refers to the CBR value (%) that occurs at the required compaction degree obtained by a modified CBR test.
- The above values are also applied to the coefficient of layer equivalency of recycled hot asphalt mixtures produced at recycled asphalt mixing plants and recycled base course materials produced at recycled base course material mixing plants.
- A coefficient of layer equivalency of 1.0 is used for porous asphalt mixtures for drainage pavement.

Tableau 10 - Coefficient d'équivalence pour les matériaux de chaussées

Le drainage n'est pas pris en compte de la même façon que pour de la méthode AASHTO, qui attribue une appréciation de qualité au drainage de la chaussée, à partir du pourcentage de jours dans l'année que la chaussée pourrait se retrouver en conditions hydriques proches de la saturation. Dans la méthode japonaise, le drainage est considéré comme un paramètre à ne pas négliger et à considérer dans le dimensionnement minutieux des dispositifs de drainage de la chaussée (pente, dispositifs superficiels et enterrés,...).

Chaussées à faible trafic

Le méthode japonaise traite également des chaussées à faible trafic. Le principe de calcul pour la définition des structures reste le même. Pour ce type de chaussée, la structure sera

constituée d'une couche de base et d'une couche de surface. L'épaisseur de la couche de surface varie en général de 3 à 4 cm.

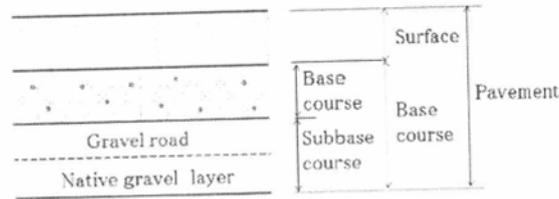


Figure 2-7 Structure of asphalt pavement for light traffic

Figure 12 - Schéma structure type chaussées à faible trafic

Les matériaux utilisés en couche de base sont très souvent traités ou stabilisés. L'épaisseur totale de la chaussée est déterminée suivant les principes déjà mentionnés précédemment, y compris pour les régions sujettes à des basses températures, où la profondeur de protection au gel doit être, si elle n'est pas connue, calculée.

Dans le tableau suivant, des épaisseurs totales en fonction du CBR sont présentées :

Table 2-16 Design CBR and the corresponding standard pavement thickness

Design CBR	1.6	2	3	4	6	8	12	20 or more
Pavement thickness cm	50	40	33	27	22	18	14	10

- [Note 1] A design CBR value of 4 in Table 2-11, for example, corresponds to a range of values larger than or equal to 4 but smaller than 6.
- [Note 2] When the pavement thickness is determined by using Table 2-11, the typical d value (Benkelman deflection under 5-ton dual-tire loads) of road surfaces is 2.0 mm or less when measurement is performed after approximately a half a year of road use by actual traffic. Accordingly, if the d value of a road surface is substantially larger than this value, the frequency of maintenance work and the like need to be reconsidered especially carefully.
- [Note 3] When the Benkelman beam test has been performed on the native gravel road surface as a preliminary test on subgrade soil, an approximate pavement thickness can be determined by using Figure 2-8. This pavement thickness corresponds to base courses constructed with mechanically stabilized materials. However, it is best to use a d value that is measured in spring or autumn except during dry periods.

Tableau 11 - Épaisseur totale de la chaussée en fonction du CBR

Dans le cas d'utilisation de matériaux traités ou stabilisés, les épaisseurs sont les suivantes :

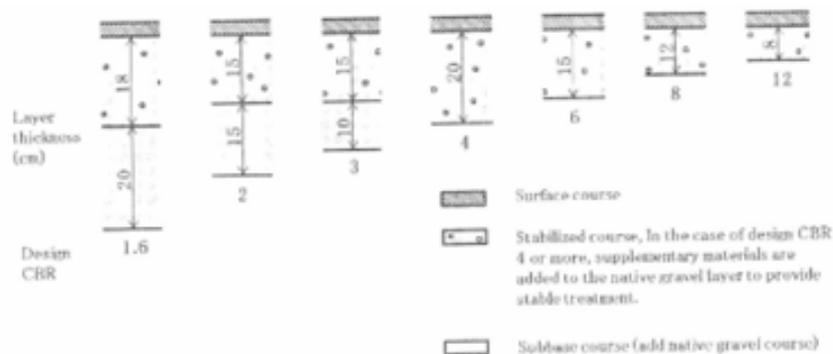


Figure 2-9 Examples of pavement structures when the base and subbase courses are subjected to stabilization

Tableau 12 - Épaisseur totale de la chaussée avec des matériaux traitées ou stabilisés

Pour les régions avec des hivers rigoureux, les épaisseurs doivent être majorées, basées sur les profondeurs de protection au gel (généralement, 65% de l'épaisseur maximale de gel) nécessaire pour la région en question. La profondeur résultante est donc comparée à l'épaisseur préconisée dans le tableau 11. L'épaisseur retenue est la valeur la plus élevée entre les deux.

3.3.3 Méthode DMRB

La méthode de dimensionnement anglaise est basée sur des résultats empiriques issus de l'analyse du comportement de sections de routes.

Depuis 1997, la méthode introduit le concept de long-life pavement (chaussée à longue durée de vie – généralement 40 ans) et permet l'utilisation de nouveaux matériaux.

Le principe de la méthode consiste en utiliser des graphes pour dimensionner la structure en fonction des données de trafic (seulement les véhicules commerciaux sont pris en compte et chaque catégorie est ramenée au essieu standard équivalent – essieu simple à roues jumelées de 80 kN).

La température de référence prise en compte dans le dimensionnement est égale à 20°C, selon l'article RGRA – Pavement design method – 2003 [15], cette température n'est pas forcément adapté aux conditions climatiques locales.

Le comportement en fatigue n'est pas considéré comme le critère de dimensionnement puisque la méthode considère que la ruine des chaussées bitumineuses est provoquée par les fissurations venues de la partie supérieure de la chaussée.

Les matériaux utilisés pour la base et la couche de surface sont :

- ▶ *DBM 50 ou DMB 125-Dense Bound Macadam* (enrobés bitumineux denses) ou *HDM - Heavy Duty Macadam*;
- ▶ *Stone Mastic Asphalt* (uniquement pour couche de roulement) et *HRA – Hot Rolled Asphalt* (béton bitumineux à chaud) ;
- ▶ EME2 (Enrobé à Module Elevé Cl 2) sur couches de forme classes 3 et 4 ;
- ▶ Matériaux traités aux liants hydrauliques (*HBM – Hydraulic Bound Materials*) – Tableau 2 : *CBGM – Cement Bound Granular Material (matériaux granulaires traités au ciment)* ; *FABM – Fly Ash Bound Material (matériaux traité à la cendre volante)* ; *SBM – Slag Bound Material (grave-laitier)*.

HBM Category	A	B	C	D
Crushed Rock Coarse Aggregate: (with coefficient of thermal expansion $<10 \times 10^{-4}$ per °C)	-	CBGM B – C8/10 (or T3) SBM B1 – C9/12 (or T3) FABM1 – C9/12 (or T3)	CBGM B – C12/15 (or T4) SBM B1 – C12/16 (or T4) FABM1 – C12/16 (or T4)	CBGM B – C16/20 (or T5) SBM B1 – C15/20 (or T5) FABM1 – C15/20 (or T5)
Gravel Coarse Aggregate: (with coefficient of thermal expansion $\geq 10 \times 10^{-4}$ per °C)	CBGM B – C8/10 (or T3) SBM B1 – C9/12 (or T3) FABM1 – C9/12 (or T3)	CBGM B – C12/15 (or T4) SBM B1 – C12/16 (or T4) FABM1 – C12/16 (or T4)	CBGM B – C16/20 (or T5) SBM B1 – C15/20 (or T5) FABM1 – C15/20 (or T5)	-

Tableau 13 - Exemples de matériaux traités aux liants hydrauliques

La structure des chaussées souples est définie à l'aide du graphique de la Figure 13, ci-dessous, ayant comme données d'entrée la classe de la plate-forme et du trafic.

Ce graphique nécessaire au dimensionnement de structures avec base en matériaux bitumineux ou base en matériaux traités aux liants hydrauliques est composé de trois parties (droite, gauche et centre). La partie centrale correspond au départ du dimensionnement, en liant le trafic à la courbe de la classe de la plate-forme. Cette partie est commune aux deux types de structures.

La partie de droite correspond à la structure entièrement en matériaux bitumineux, pour déterminer l'épaisseur totale des couches bitumineuses (surface + assise), il faut lier la courbe de la classe de la plate-forme au matériau choisi pour la couche de base et ensuite aller vers l'axe des abscisses pour déterminer l'épaisseur.

La partie gauche correspond à la structure avec couche de base en matériaux traités aux liants hydrauliques.

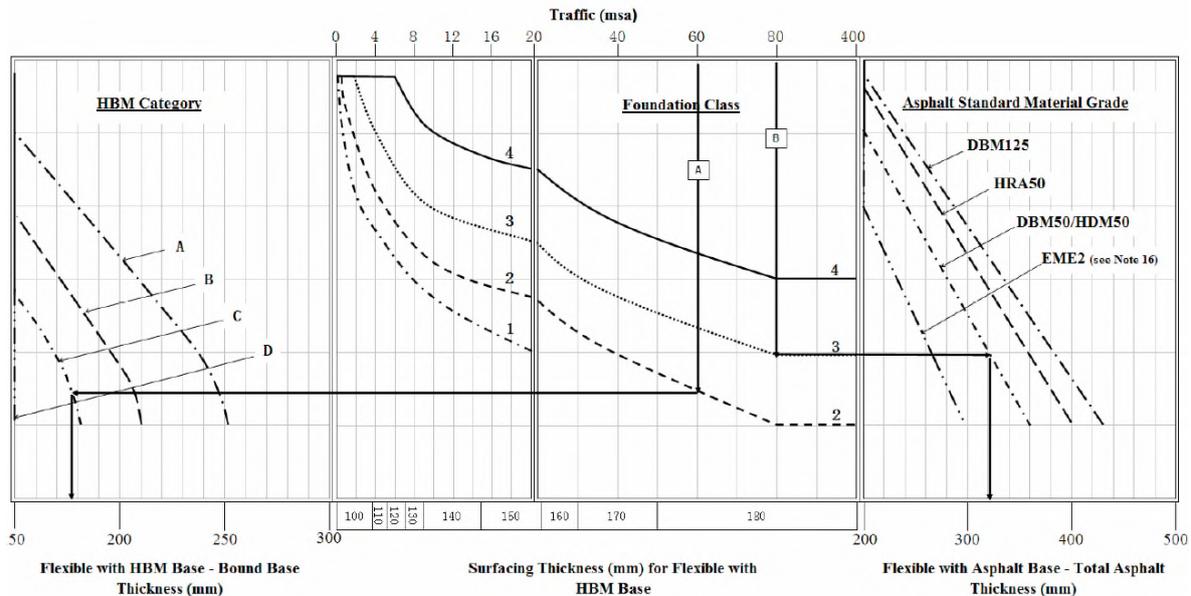


Figure 13 – Graphique pour le dimensionnement de chaussées souples, guide DMRB

La ligne **A** correspond à la structure dont la base est en matériaux traités aux liants hydrauliques et la ligne **B** correspond à une structure avec une base en matériaux bitumineux.

Les considérations suivantes sur le dimensionnement des chaussées souples peuvent être faites :

- ▶ Les épaisseurs doivent être arrondies au nombre supérieur ;
- ▶ Pour des couches de base en matériaux bitumineux, l'épaisseur minimale est de 200mm et de 100mm pour des couches en matériaux traités aux liants hydrauliques ;
- ▶ Si une couche d'enrobé drainant est utilisée comme couche de roulement, le bitume de l'enrobé devra être modifié par polymères ou par des fibres et mise en œuvre avec 50mm d'épaisseur sur une couche de liaison dense et parfaitement imperméable de 60 mm ;
- ▶ Une couche de liaison est nécessaire en dessous d'une couche de *TSCS (Thin Surface Course System)* mais elle est optionnelle dans le cas de l'utilisation de bétons bitumineux à chaud (*HRA*) ;
- ▶ L'EME2 conseillé pour des plate-forme Classe 3 et 4 ou pour des Classe 2 qui présente au moins 120 MPa.

Prise en compte du sol

Les performances de la plate-forme s'appuient sur la valeur de CBR du sol support ou du module :

$$\text{▶ } E \text{ (MN/m}^2\text{)} = 17,6 \times (\text{CBR})^{0,64}$$

Si l'essai de CBR ne peut pas être réalisé sa valeur peut être estimée selon la nature du sol support (Tableau 14). Pour être utilisé, le sol support doit présenter un CBR minimum de 2,5%.

SOIL	PI %	Thin	Thick
		Estimated CBR %	
Heavy Clay	70	2	2
	60	2	2
	50	2	2.5
	40	2.5	3
Silty Clay	30	3	4
Sandy Clay	20	4	5
	10	3	6
Silt*	-	1	1
Sand (poorly graded)	-	20	
Sand (well graded)	-	40	
Sandy Gravel (well graded)	-	60	
* estimated assuming some probability of material saturating			
Notes 1) A thick layered construction is a depth to subgrade of 1200mm 2) A thin layered construction is a depth to subgrade of 300mm			

Tableau 14 - Estimation du CBR du sol, selon la méthode DMRB

La plate-forme est définie selon 4 classes en fonction de leur module :

- ▶ Classe 1 $E \geq 50$ MPa ;
- ▶ Classe 2 $E \geq 100$ MPa ;
- ▶ Classe 3 $E \geq 200$ MPa ;
- ▶ Classe 4 $E \geq 400$ MPa.

Prise en compte des matériaux granulaires

L'épaisseur des couches de forme et fondation est déterminée en fonction du CBR (ou module) du sol support, du module souhaité pour la plate-forme et du type de matériaux utilisés, à l'aide de graphiques.

Le dimensionnement de la plate-forme a pour objectif d'obtenir, sous la chaussée, un minimum de 15% de CBR. Pour une valeur inférieure, une couche de matériau granulaire est ajoutée.

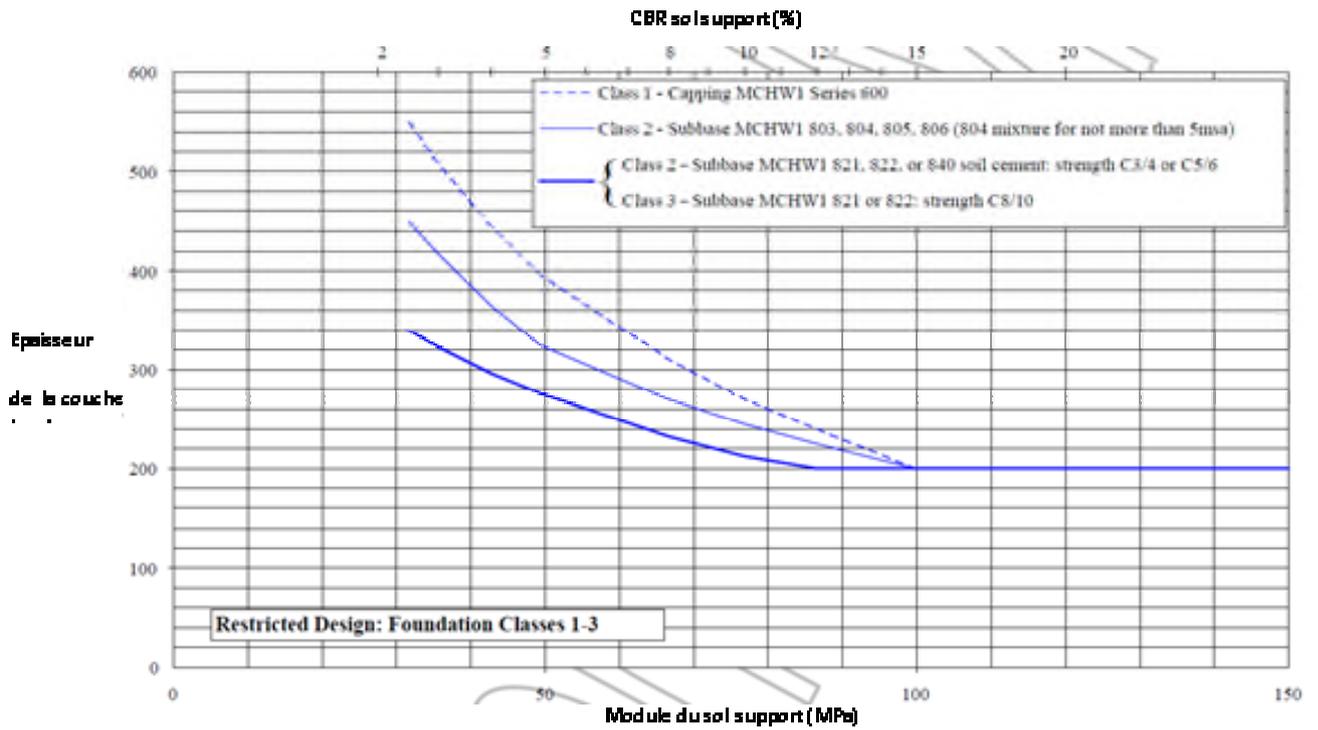


Figure 14 - Plate-forme Classe 1-3 – Solution avec une seule couche (fondation ou forme)

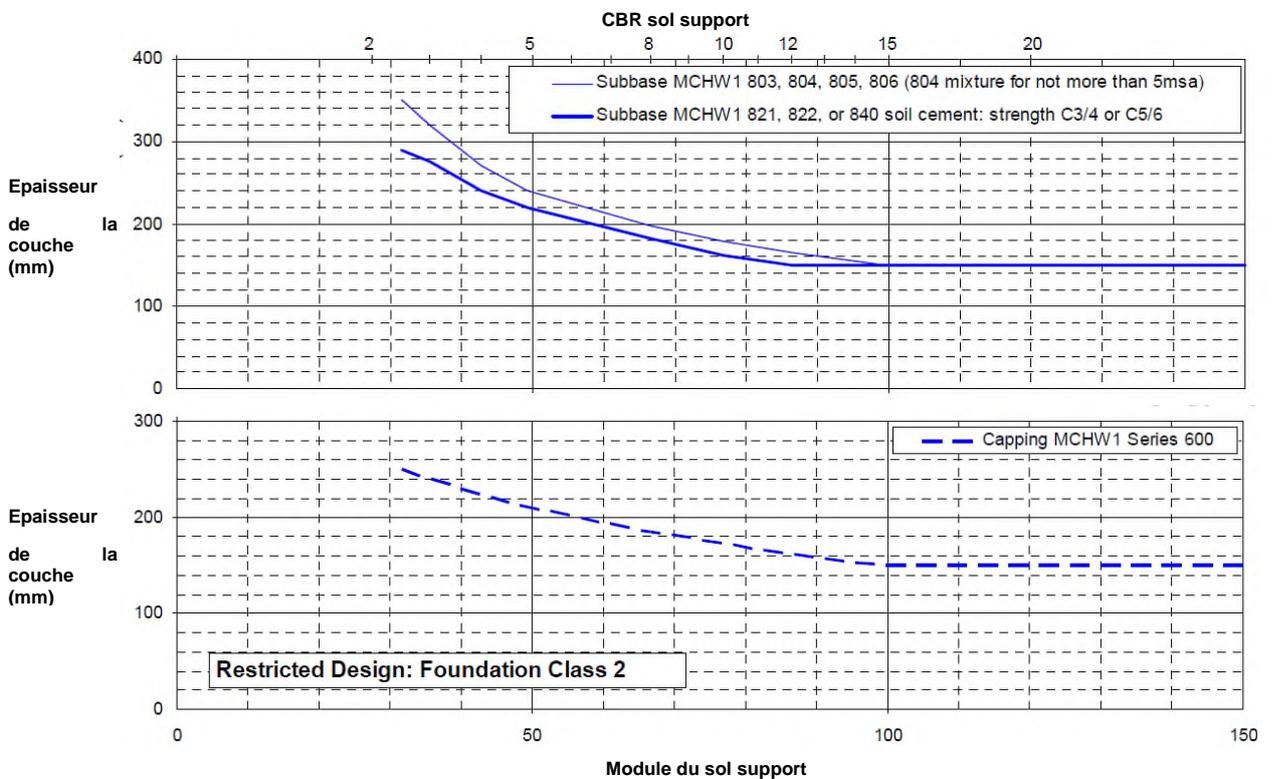


Figure 15 - Plate-forme Classe 2 – Solution avec couche de fondation et couche de forme

3.4 Les méthodes analytiques

Les méthodes analytiques, comme la méthode française et australienne, consistent à vérifier que les sollicitations dans la structure, liées au passage d'une charge de référence restent inférieures aux valeurs admissibles pour un nombre de cycles donné.

La méthode est probabiliste et tient compte de l'importance de la dispersion et du caractère aléatoire des divers facteurs agissant directement sur la tenue dans le temps de la chaussée.

Il existe une dispersion dans les caractéristiques des matériaux, d'une part, et dans les épaisseurs de mise en œuvre, d'autre part. Par ailleurs, divers facteurs qui ne peuvent généralement être prédits précisément, varient au cours de la durée de vie de la chaussée (paramètres d'environnement et de trafic).

Le caractère probabiliste se traduit notamment par une probabilité d'apparition de dégradations avant la fin de la durée de vie de la structure. Cette probabilité de rupture est appelée « risque de calcul ». La chaussée est dimensionnée pour que la probabilité de la rupture à la fin de la durée de vie soit égale au risque de calcul.

Ces méthodes sont basées sur le calcul de la réponse théorique de la structure soumise à une sollicitation et utilisent le comportement approché linéaire du sol avec le module d'Young E. Le calcul se fait en deux étapes :

- ▶ Calcul des contraintes et des déformations admissibles dans la chaussée en fonction du trafic attendu (modèle de fatigue et de déformation permanente)
- ▶ Calcul des épaisseurs requises pour rencontrer les critères de contraintes et/ou des déformations admissibles.

L'avantage des méthodes rationnelles est de fournir une réponse quasi instantanée au dimensionnement et l'extrapolation des résultats. Cependant un calage du modèle est nécessaire.

3.4.1 La méthode Austroads

Ce paragraphe décrit la méthode Austroads qui est une méthode **mécanistique et rationnelle**, ce qui veut dire :

- ▶ qu'elle s'appuie sur des lois comportementales des matériaux utilisées en chaussées, à savoir des lois de fatigue définies en laboratoire et sur la base de calages réalisés à partir des retours d'expériences. Les calages sont issus des auscultations sur les chaussées existantes et/ou des Accelerated Loading Facilities qui sont des appareils visant à reproduire en quelques mois sur des pistes d'essais le trafic d'une chaussée sur une durée de vie de 20 ans (comme notamment le manège de fatigue LCPC-IFSTTAR) ;
- ▶ qu'elle est mécanistique, c'est-à-dire qu'elle utilise un logiciel multicouche (CIRCLY) basé sur le modèle de Burmister pour calculer les contraintes et les déformations dans chaque couche de la chaussée étudiée. Les données d'entrée de CIRCLY sont donc les mêmes que celles d'Alize (pour la description du logiciel Alize voir chapitre 3.4.3), à la réserve près que toutes les interfaces sont considérées comme collées dans le cadre de la démarche qualité ;
- ▶ qu'elle est probabiliste car elle prend en compte un facteur de risque admissible qui varie en fonction du niveau de trafic supporté par la chaussée et de la proportion de chaussée non dégradée jugée acceptable à la fin de la durée de vie théorique.

La méthode intègre les éléments de dimensionnement :

- ▶ des chaussées souples constituées de matériaux granulaires non liés et d'une ou plusieurs couches bitumineuses ;
- ▶ des chaussées bitumineuses épaisses ;

- ▶ des chaussées semi-rigides présentant une association de matériaux traités au ciment et de matériaux bitumineux ;
- ▶ et des chaussées rigides en béton de ciment.

Cette méthode prend en compte également l'évaluation de la plateforme support et des performances des matériaux de chaussées.

Elle peut être utilisée :

- ▶ soit par le processus mécanistique complet (chapitre 8.2 du guide Austroads [3]), en calculant les valeurs de déformations et contraintes admissibles dans les couches de chaussées à partir des lois de fatigue respectives des matériaux, puis en les comparant aux valeurs issues des calculs par le modèle CIRCLY ;
- ▶ soit à partir des abaques. Exemple Design Chart du chapitre 8.5 du guide [3].

Pour dimensionner les chaussées granulaires, avec une couche de roulement en matériaux bitumineux mince (épaisseur inférieure à 4 cm) le graphique suivant peut être utilisé, conformément aux recommandations du chapitre 8.3 du guide Austroads.

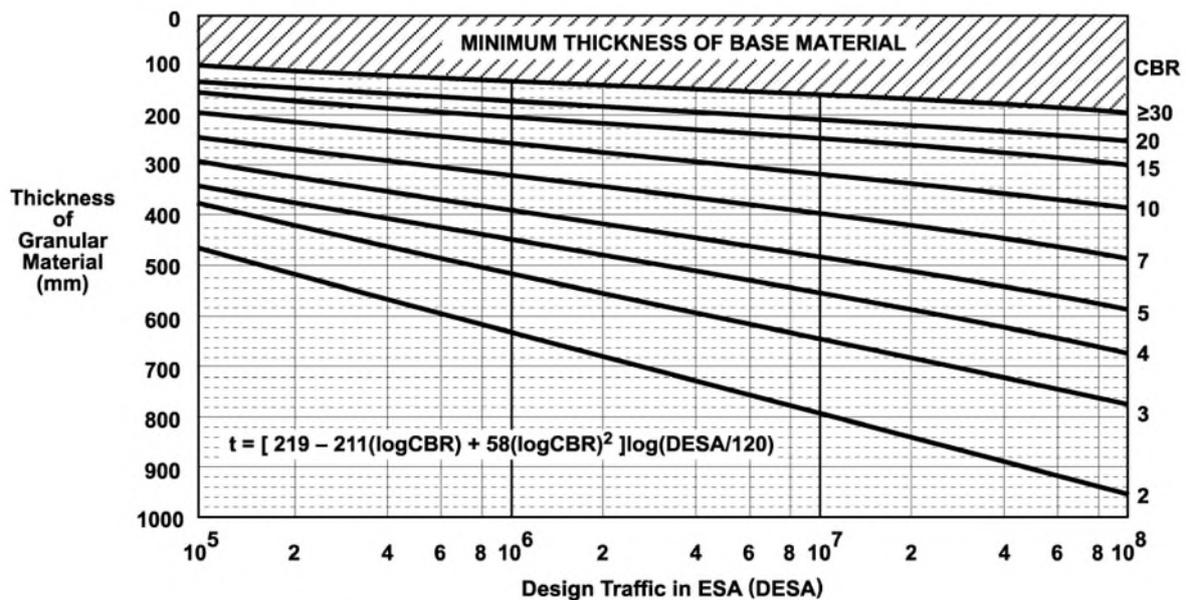


Figure 8.4: Design chart for granular pavements with thin bituminous surfacing

Figure 16 – Abaque de dimensionnement pour les chaussée souple, guide Austroads

Les épaisseurs de la couche de fondation et de la couche de base granulaire dépendent du trafic et le CBR de la couche sous-jacente. Ce graphique a été élaboré empiriquement.

La qualité minimum pour une couche de base granulaire est CBR ≥ 80 , avec une épaisseur minimum de 10 cm.

Pour les chaussées à faible trafic dans un environnement sec une couche de base d'une qualité plus faible peut être envisagée avec une valeur de CBR ≥ 60 .

3.4.1 La méthode Belge

Les principes de la méthode belge de dimensionnement de chaussées sont décrits dans le « Code de bonne pratique pour le dimensionnement des chaussées à revêtement hydrocarboné [18] ».

La méthode s'appuie sur l'application d'un modèle basé sur la théorie des systèmes multicouches, constitué de couches de matériaux homogènes et isotropes. Le modèle prend en compte :

- ▶ Le trafic à supporter pendant la durée de service, du nombre d'essieux équivalents et la répartition du trafic sur la chaussée ;
- ▶ Les caractéristiques des matériaux en laboratoire, afin de déterminer leur module, comportement à la fatigue et coefficient de poisson ;
- ▶ L'approche rationnel du comportement de la chaussée par :
 - la détermination de la déformation permanente verticale au sommet du sol support et couche granulaire, et de la déformation par fatigue des à la base de la couche de matériaux bitumineux, pour les chaussées souples.

La méthode belge est divisée en deux parties. La première, « Synopsis », présente les solutions de dimensionnement d'une façon simple au travers d'abaques. La deuxième partie, « Commentaires sur la méthode de dimensionnement », permet d'identifier les éventuelles divergences entre les conditions prises en compte dans la partie « Synopsis » et les conditions propres au projet.

Il convient de rappeler que la méthode ne propose pas des solutions toutes prêtes pour tous les cas possibles de données d'entrées (matériaux, états saisonniers, sols et trafic), elle permet toutefois de guider le choix de la structure à retenir. Compte tenu du grand nombre de données, l'application de la méthode nécessite l'utilisation d'un ordinateur. À l'époque de l'édition du code de bonne pratique, le logiciel utilisé était CRR-ORN093. Depuis 2011, le logiciel DimMET est utilisé en Wallonie. La dernière version de ce logiciel est la V 2.4.0.0.

Dans le présent rapport, seule la méthode « simplifiée » (dimensionnement par abaques) sera présentée.

Deux types de structures sont traitées dans ce document :

- ▶ Chaussées souples : revêtement hydrocarboné, « fondation » en empierrement « sous-fondation » en matériaux granulaires ;
- ▶ Chaussées semi-rigides : revêtement hydrocarboné, « fondation » en béton maigre et « sous-fondation » en matériaux granulaires.

Dans la méthode belge, une nomenclature propre est utilisée pour définir les couches de la chaussée :

- ***La couche appelée « revêtement hydrocarbonés » est composée de la couche de surface et de la couche de base en matériaux bitumineux ;***
- ***La couche appelée « fondation » correspond à la couche de fondation en matériaux granulaires ou en béton maigre ;***
- ***La couche appelée « sous-fondation » correspond la couche de forme.***

Dans le présent rapport seules les chaussées souples seront traitées.

La durée de dimensionnement prise en compte par la méthode est de 20 ans. Si la durée de dimensionnement est différente de 20 ans il faut l'adapter proportionnellement par rapport à la durée de 20 ans. Le tableau suivant présente les classes de trafic en fonction du type de chaussée :

Nombre N_c de véhicules commerciaux à prendre en considération dans le dimensionnement des chaussées pour une durée de service de 20 ans (1 sens de circulation, voie de droite)

Types de routes	N_c (*)
Autoroute (2 × 3 voies)	$2,7 \times 10^7$
Autoroute (2 × 2 voies)	$1,6 \times 10^7$
Primaire I (2 × 2 voies)	$1,6 \times 10^7$
Primaire I (1 × 4 voies)	$1,4 \times 10^7$
Primaire I (1 × 3 voies)	$8,1 \times 10^6$
Primaire II (1 × 2 voies de 3,50 m)	
Débit élevé	$5,4 \times 10^6$
Débit moyen	$1,6 \times 10^6$
Débit faible	$5,4 \times 10^5$
Primaire II (1 × 2 voies de 3 m)	
Débit élevé	$3,75 \times 10^6$
Débit moyen	$1,13 \times 10^6$
Débit faible	$3,75 \times 10^5$
Secondaire (1 × 2 voies)	
Débit élevé	$1,2 \times 10^6$
Débit moyen	$1,2 \times 10^5$
Débit faible	$1,8 \times 10^4$

(*) Si la durée de service adoptée est différente de 20 ans, il suffit d'adapter proportionnellement les valeurs N_c présentées dans le tableau.

Tableau 15 - Classes de trafic en fonction du type de route (par sens sur la voie la plus chargée)

Le coefficient de répartition transversale du trafic (k), appliqué par multiplication au nombre de véhicules commerciaux (N_c), dépend de la largeur (L) de la voie de circulation :

- ▶ Pour $L \geq 3.0$ m, $k=1$;
- ▶ Pour tous les autres cas, $k=0.4$, le trafic de dimensionnement sera donc $0.4 \times N_c$

La prise en compte de l'essieu pour le calcul du nombre de véhicules commerciaux sont pris en compte comme présenté dans le tableau suivant. La présence de surcharges est considérée quand l'essieu est supérieur à 13 tonnes (essieu standard):

Charges par essieu (P_i) et proportions (f_i)

Charges P_i par essieu (t)	Proportions f_i des essieux de charge P_i dans l'ensemble des essieux de véhicules commerciaux (x 100)	
0,5	0,70	
1,5	9,73	
2,5	15,35	
3,5	20,71	
4,5	18,86	
5,5	10,68	
6,5	5,45	
7,5	3,69	
8,5	3,59	
9,5	2,65	
10,5	3,33	
11,5	2,22	
12,5	1,56	
<hr/>		
surcharges	13,5	0,89
	14,5	0,32
	15,5	0,18
	16,5	0,09

L'abaque ci-dessous permet de définir l'épaisseur des couches de chaussées en empierrement (fondation) et en matériaux traités au liants hydrocarbonés (couche de surface + couche de base) pour les chaussées souples en fonction du trafic.

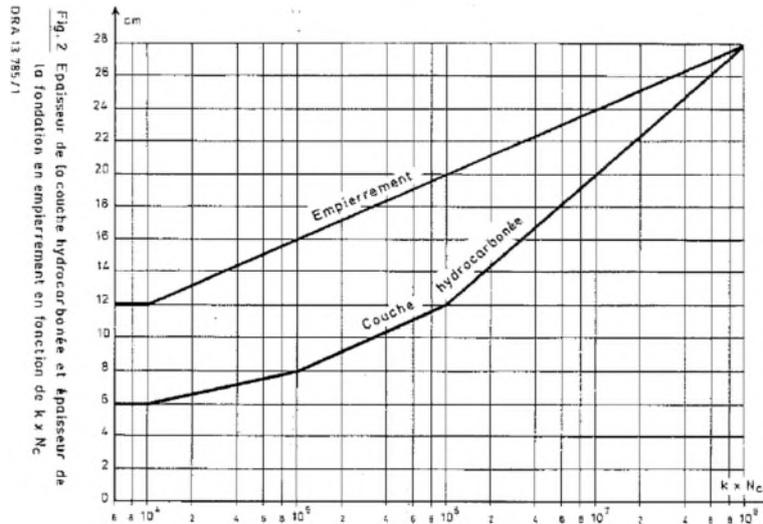


Figure 17 – Abaque - Épaisseur des couches en empièrrement et en matériaux traités aux liants hydrocarbonnés en fonction du trafic

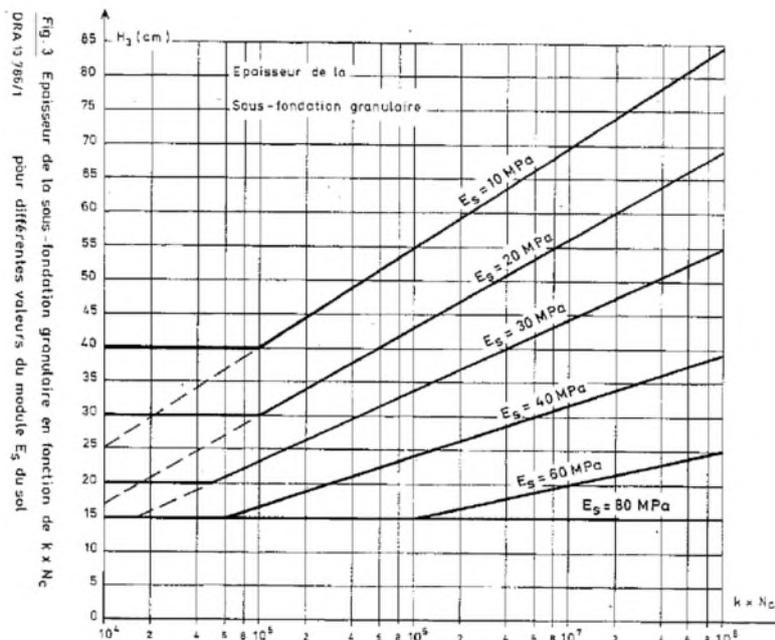


Figure 18 - Épaisseur de la couche de sous-fondation (couche de forme) en fonction du trafic $k \times N_c$ x module du sol E_s

Les épaisseurs obtenues sont redistribuées en fonction du type de matériau utilisé conformément aux prescriptions belges (CCT 150, 200, 300) :

- ▶ Pour les couches hydrocarbonnées, les épaisseurs nominales pour les produits hydrocarbonnés type I, II, III ou IV doivent être respectées, par exemple :
 - Béton hydrocarbonné type I = 5 cm ;
 - Béton hydrocarbonné type II = 3 cm ;
 - Enrobé type III = mini 14 cm.
- ▶ L'épaisseur de la sous-fondation (couche de forme) ne doit pas être inférieure à 15 cm ;
- ▶ L'épaisseur de la sous-fondation doit être corrigée par les facteurs suivants en fonction de la nature du matériau granulaire :

- Mélange pierreux ou de graves naturelles : 1 ;
- Sable = 1.16 ;
- Schiste brûlé = 1.30.

La méthode prend également en compte l'endommagement provoqué par les cycles de gel-dégel en considérant les quatre facteurs suivants :

- ▶ Le degré de gélivité du sol (fonction de la situation géographique)
- ▶ La position de la nappe phréatique
- ▶ L'épaisseur totale de la structure résultante du dimensionnement mécanique
- ▶ La profondeur de pénétration du gel :
 - $Z = 5 \times J^{1/2}$

Où Z = profondeur de pénétration du gel (cm)

J = indice de gel (°C x jours)

La nécessité de dimensionnement d'une couche de protection supplémentaire au gel est définie par les conditions présentées dans la figure ci-après :

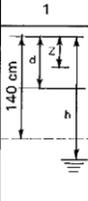
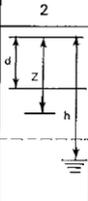
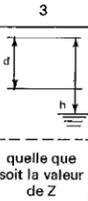
Situation	1	2	3
Épaisseur totale de la structure: d (cm)			
Profondeur de pénétration du gel: Z (cm)			
Profondeur de la nappe phréatique: h (cm)			quelle que soit la valeur de Z
Gélivité du sol			
Sol non gélif	non	non	non
Gélivité moyenne	non	oui ($\alpha = 0,72$)	oui ($\alpha = 0,8$)
Forte gélivité	non	oui ($\alpha = 0,90$)	oui ($\alpha = 1$)

Figure 19 - Conditions de dimensionnement de la protection au gel

Le calcul de l'épaisseur totale de matériaux non gélifs (D) nécessaire à la protection contre gel est fait par l'équation suivante : $D \text{ (cm)} = \alpha \times Z$.

Suite au calcul de D, les actions suivantes sont possibles

- ▶ Si $D-d \text{ (ou } d'') \leq 0$, le dimensionnement (mécanique) suffit ;
- ▶ Si $D-d \text{ (ou } d'') > 0$, il y a lieu :
 1. D'augmenter l'épaisseur de la sous-fondation ;
 2. De remplacer le sol gélif par un sol non gélif sur une épaisseur égale à D-d ;
 3. De traiter le sol gélif aux liants hydrauliques sur une épaisseur D-d ;
 4. De combiner les solutions 1, 2 et 3 ;
 5. De choisir une nouvelle structure de chaussée

Dans le cas de routes à faibles trafics, les solutions présentées ne sont pas obligatoires. Cependant, le risque de ne pas dimensionner au gel/dégel doit être évalué.

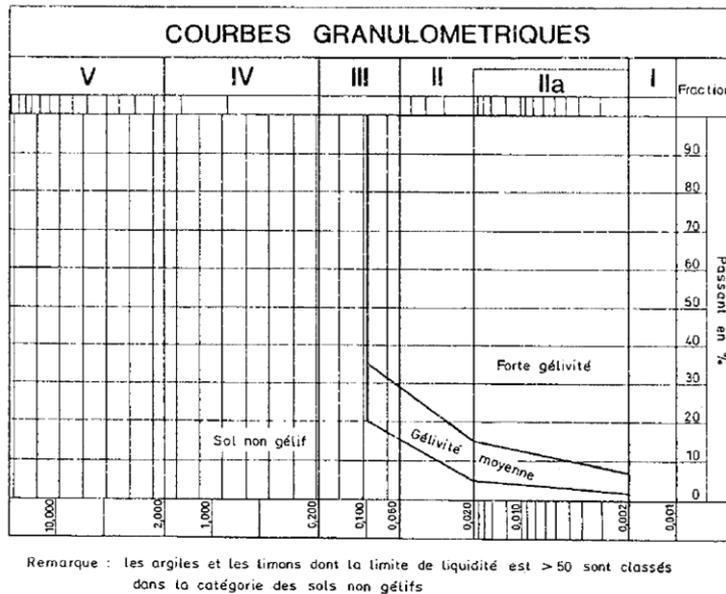


Figure 20 - Gélivité des sols fins

3.4.2 Limites admissibles

En générale les méthodes de dimensionnement dit rationnelles distinguent 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 $\epsilon_{t,adm}$;
- ▶ 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 $\epsilon_{z,adm}$.

Concernant les chaussées souples l'endommagement $\epsilon_{z,adm}$ est à vérifier et éventuellement l'endommagement $\epsilon_{t,adm}$, selon le méthode choisie.

Déformation verticale admissible au sommet du sol support (μ_{def})

L'endommagement par cumul des déformations permanentes dans les matériaux non traités est pris en compte à travers leur déformation verticale réversible maximale admissibles $\epsilon_{z,adm}$.

La déformation verticale au sommet du sol support (ϵ_z) est calculée à l'aide des équations suivantes :

- ▶ Méthode Austroads : $\epsilon_{z,adm} = 9300 NE^{-0,142}$
- ▶ DMRB : $\epsilon_{z,adm} = 14\,950 NE^{-0,253}$
- ▶ Catalogue d'Algérie $\epsilon_{z,adm}$ seul pour structure souple = 22 000 NE^{-0.235}
- ▶ Méthode française et le Catalogue du Sénégal:
 - Faible trafic $NE \leq 250\,000$: $\epsilon_{z,adm} = 16\,000 * NE^{-0,222}$;
 - Fort trafic $NE \geq 250\,000$: $\epsilon_{z,adm} = 12\,000 * NE^{-0,222}$

- ▶ Viziret : $\varepsilon_{z \text{ adm}} = 21000 \text{ NE}^{-0,25}$ pour 85% fiabilité
- ▶ Catalogue espagnol : $21600 \text{ NE}^{-0,28}$
- ▶ Méthode Belge :
 - Sol : $\varepsilon_{z \text{ adm}} = 1.1 \times 10^{-2} \times \text{NE}^{-0,23}$

où NE est le nombre équivalent d'essieux de référence correspondant au trafic poids lourds cumulé sur la durée de calcul retenue.

Les courbes résultantes de l'application de ces équations figurent dans le graphique ci-dessous :

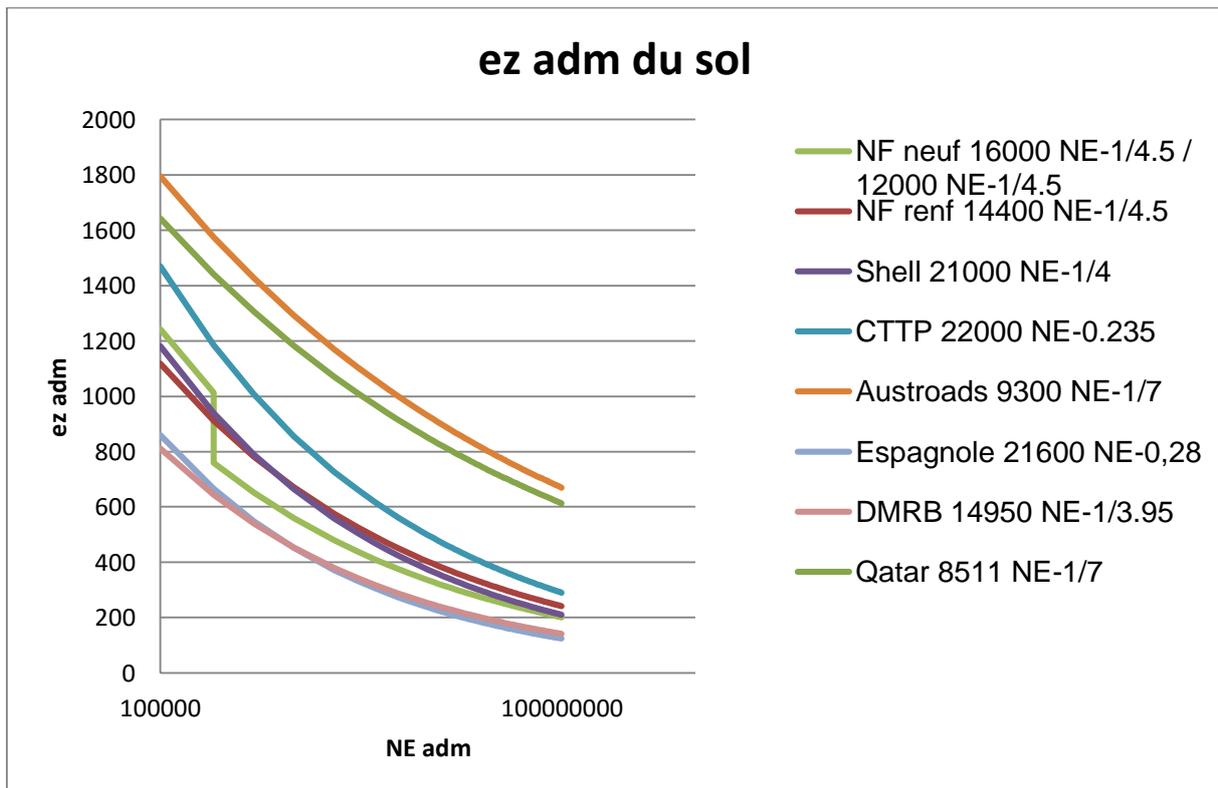


Figure 21 - Évolution de la déformation verticale du sol admissible en fonction du NE

On peut noter, que les deux méthodes les plus optimistes (qui permettent la valeur admissible la plus haute pour un nombre de passage donné) sont la méthode australienne et la méthode utilisée au Qatar. Les formules espagnoles et anglaises donnent les valeurs admissibles les plus basses, ces méthodes sont les plus sévères vis-à-vis de la vérification de la plate-forme.

Les déformations verticales admissibles au sommet du sol support, données par la méthode française se trouvent au milieu du graphique, les valeurs les plus proches sont celles issues de la méthode Shell.

Déformation verticale admissible à la base des matériaux granulaires (μ_{def})

▶ Méthode Belge :

- Couches hydrocarbonés : $\varepsilon_{z adm}(N) = \varepsilon_z(1) \times NE^\delta$

Où :

$\varepsilon_z(NE)$: déformation permanente unitaire verticale après N applications de la charge, cycles causée par le premier cycle de chargement ;

$\varepsilon_z(1)$: déformation permanente unitaire verticale causée par le premier cycle de chargement ;

δ : exposant compris entre 0.1 et 0.4 en fonction de la compacité du matériau et des contraintes appliquées.

Déformation admissible à la base des matériaux bitumineux

Selon la méthode française pour les structures souples, l'épaisseur de la couche de base granulaire est fixée à 15 ou 20 cm en fonction du trafic et le dimensionnement porte uniquement sur la détermination de l'épaisseur de la couche de fondation granulaire.

Dans les méthodes étrangères la structure doit être vérifiée à la base des matériaux bitumineux également. C'est la raison pour laquelle cet endommagement est intégré dans notre étude.

L'endommagement par fatigue des matériaux bitumineux est pris en compte à travers leur déformation d'extension horizontale réversible maximale admissible $\varepsilon_{t adm}$.

Les équations pour le calcul de la déformation admissible à la base des matériaux bitumineux sont les suivantes :

▶ Méthode française pour les chaussées bitumineuses épaisses, à titre indicative:

$$\varepsilon_{t adm} = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz}) \times (NE/10^6)^b \times (E(10^\circ\text{C})/E(\theta_{\text{éq}}))^{0,5} \times k_c \times k_r \times k_s$$

Avec :

- NE : nombre d'essieux
 - b : pente de la droite de fatigue
 - k_c : coefficient de calage destiné à ajuster la valeur de la contrainte admissible en fonction du risque de calcul et des facteurs de dispersion
 - k_r : coefficient de calage lié au risque de calcul et aux facteurs de dispersion
 - k_s : coefficient lié à la plateforme
- ▶ Le Catalogue du Sénégal : il reprend la même équation que la méthode française détaillée ci-avant avec une température de référence de 34°C.

- ▶ Méthode CEBTP : $\varepsilon_{t adm} MTLB = \varepsilon_0 \times (N_0/N)^{1/b}$

Avec : $b = 5$ à 5.25 , sans coefficient de calage.

- ▶ Méthode australienne :

$$N = RF \left[\frac{6918(0.856 V_b + 1.08)}{E^{0.36} \mu\epsilon} \right]^5$$

where

- N = allowable number of repetitions of the load
- $\mu\epsilon$ = load-induced tensile strain at base of the asphalt (microstrain)
- V_b = percentage by volume of bitumen in the asphalt (%)
- E = asphalt modulus (MPa)
- RF = reliability factor for asphalt fatigue (Table 6.15).

Table 6.15: Suggested reliability factors (RF) for asphalt fatigue

Desired project reliability				
80%	85%	90%	95%	97.5%
2.5	2.0	1.5	1.0	0.67

- ▶ Méthode Shell :

$$N = (0.856V_B + 1.08) / (S_{mix}^{0.36} \times \mu\epsilon)^5$$

No reliability factor,
 V_B in % and S_{mix} in Pa

$$\epsilon = 135 \times N^{-1/5}$$

$V_B = 7\%$ for a conventional road base asphalt

- ▶ Catalogue espagnol :

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

- Pour béton bitumineux
- Pour béton bitumineux avec un module élevé (comme EME2)

$$\epsilon_r = 6,617 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

- ▶ Méthode Belge :

- Couches hydrocarbonés : $\epsilon_{t adm} = 1.6 \times 10^{-3} \times NE^{-0,21}$
 $= 1.6 \times 10^{-3} \times NE^{-0,21}$

3.4.3 Valeurs réelles

Pour calculer les contraintes et les déformations réelles dans chaque couche de la chaussée étudiée, des outils informatiques spécialisés sont utilisés.

Le logiciel ALIZE-LCPC est le logiciel de référence utilisé pour les calculs de dimensionnement des chaussées en France. À l'image de la méthode rationnelle, sa vocation première est le dimensionnement des chaussées neuves, routières et autoroutières, pour toutes classes de trafic.

Il permet de réaliser les calculs des sollicitations créées par le trafic dans ces structures, calculs indispensables à la mise en œuvre de la méthode française de dimensionnement rationnel des chaussées neuves et des renforcements, élaborée par le LCPC et le SETRA dès la fin des années 70. Le noyau théorique du programme repose sur la solution au problème du multicouche élastique linéaire isotrope, proposée par D. Burmister.

Le logiciel CYRCLY est également un logiciel multicouche basé sur le modèle de Burmister, comme le logiciel Alizé, il est utilisé avec la méthode de dimensionnement australienne.

Des logiciels aux élément finis peuvent être également utilisés dans le dimensionnement de chaussées. Par exemple le logiciel César est utilisé pour la simulation des effets de gradients thermiques pour le dimensionnement de chaussées en dalles de béton. Ces logiciels sont utilisés également pour les calculs des structures « ferroviaires » ; et les structures aéronautiques.

3.5 Les catalogues des chaussées

3.5.1 Méthode Espagnole

La méthode espagnole est présentée dans la norme 6.1 IC, Secciones de firme, de la instrucción de carreteras de 2003 [11]. Cette norme est équivalente à un catalogue de structures, car elle définit les épaisseurs des différentes couches en fonction des classes de trafic PL et la classe de la plate-forme.

Les structures types proposées contiennent 3 ou 4 chiffres :

- ▶ Les premiers chiffres indiquent la classe de trafic : T00, T0, T1, T2, T31, T32, T41, T42 ;
- ▶ L'avant dernier chiffre indique la classe de la plate-forme : E1, E2 ou E3 ;
- ▶ Le dernier chiffre le type de chaussées 1 - structure bitumineuse sur base granulaire, 2 - structure bitumineuse sur base traitée, 3 – structure mixte ; 4 - structure en béton.

La figure suivante (figure 2.2 de la norme) définit les structures pour des chaussées à faible trafic (TMJA PL < 200 PL/jour) :

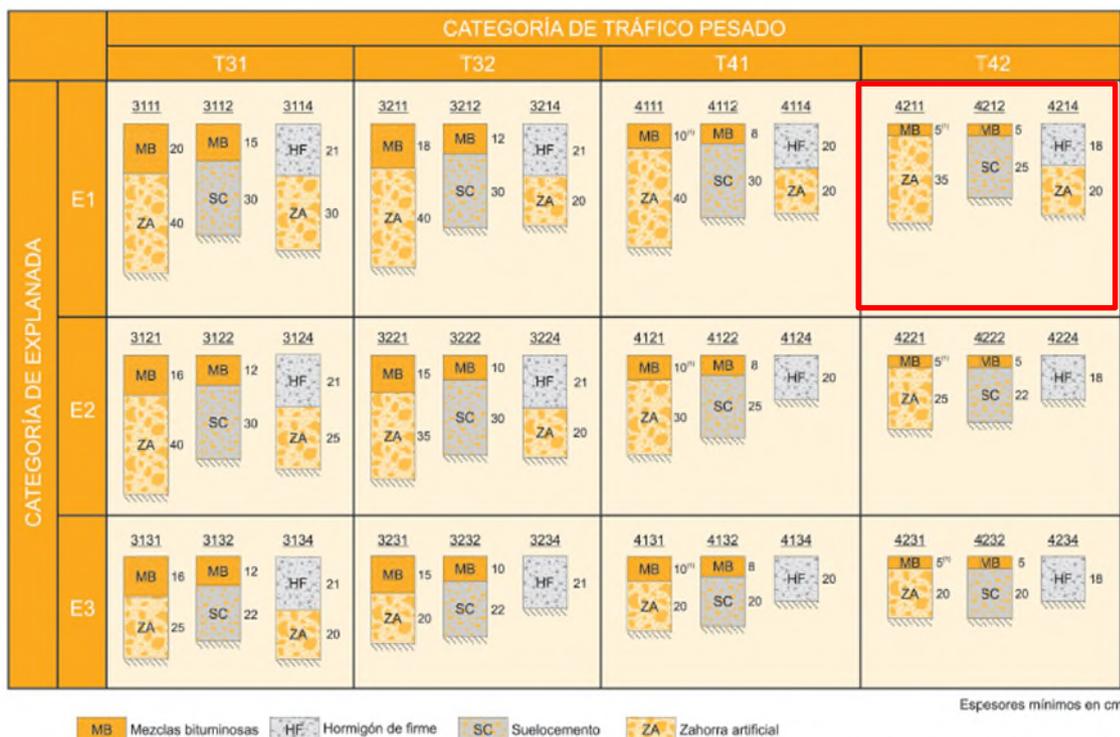


Figure 22 – Structures proposées selon le Catalogue Espagnole

Par exemple, pour la classe de trafic T42 (TMJA PL \leq 25 PL/jour) et pour une plate-forme type E1 (EV2 \leq 60 MPa) trois types de structures sont envisageables :

- ▶ 4211 : 5 cm de matériaux bitumineux sur 35 cm base granulaire ;
- ▶ 4212 : 15 cm de matériaux bitumineux sur 25 cm base traitée ;
- ▶ 4214 : 18 cm du béton sur 20 cm base granulaire.

La norme donne également la possibilité de modifier les structures proposées avec l'utilisation du coefficient d'équivalence, présenté dans le tableau 5 de la norme. Grâce à ce coefficient, il est possible de trouver l'épaisseur équivalente d'un matériau différent de celui proposé dans le catalogue.

3.5.2 Méthode TRL Overseas Road Note 31

La méthode présentée dans le TRL Overseas Road Note [1] est applicable pour le dimensionnement des chaussées souples dans le pays tropicaux et subtropicaux. Du nom de Transport Road Research Laboratory, la TRRL fait partie des méthodes pratiques de dimensionnement. Elle est issue de la méthode CBR et s'appuie sur cette dernière pour publier des abaques en 1962 appelés Road Note 29 à la suite des observations des chaussées britanniques durant 15ans. Ces abaques fixent les épaisseurs minimums du revêtement et de la couche de base en fonction du trafic en 1971 le TRRL de Londres publie la Road Note 31 pour les territoires anglophones (la 29 étant relégué à la métropole).

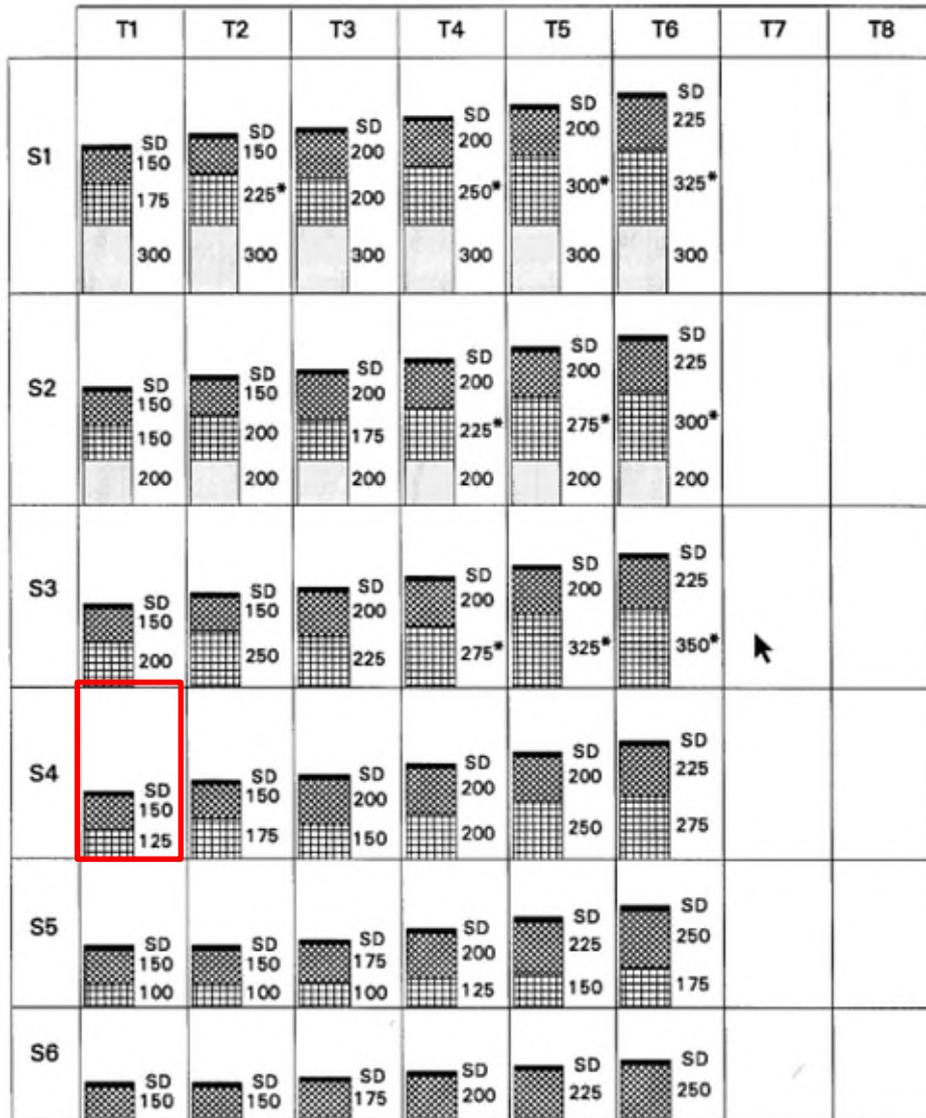
Ce guide insiste sur les aspects essentiels :

- ▶ la prise en compte de l'influence du climat tropical sur les conditions de teneur en eau de sol de plateforme. Les sols de plateforme sont classés en fonction du niveau de la nappe et de ses fluctuations en fonction des saisons.
- ▶ L'adoption souhaitable d'un aménagement par étapes de la chaussée lorsque le taux d'accroissement du trafic est élevé ou que les prévisions à long terme sont incertaines.

La quatrième édition de la note intègre les résultats des d'expériences à grande échelle où tous les facteurs affectant la performance ont été mesurés avec précision.

Le schéma suivant présente une chaussée souple avec une couche de surface mince. Les épaisseurs de la couche de base et du revêtement sont fixées en fonction du trafic exprimé en nombre d'essieux standards de 8.2tonnes cumulés par sens de circulation pendant la durée de vie. La couche de fondation est déterminée en fonction du CBR de la plateforme avec cependant une épaisseur minimale de la couche de fondation prise à 10 cm. Le CBR de la plateforme correspond à la teneur en eau la plus élevée susceptible de se produire dans le sol après la mise en service de la route.

CHART 1 GRANULAR ROADBASE / SURFACE DRESSING



Note: 1 * Up to 100mm of sub-base may be substituted with selected fill provided the sub-base is not reduced to less than the roadbase thickness or 200mm whichever is the greater. The substitution ratio of sub-base to selected fill is 25mm : 32mm.
2 A cement or lime-stabilised sub-base may also be used.

Figure 23 – Structures de chaussées souples, selon le Road Note 31

Par exemple, le catalogue propose la structure suivante pour une classe de trafic T1 (trafic cumulé < 300.000 PL) pour une plate-forme type S4 (CBR entre 8 et 14%) : ESU sur 15 cm de couche de base granulaire sur 12,5 cm de couche de fondation granulaire.

3.5.3 Méthode SATCC – Afrique du Sud

La méthode SATCC (Southern Africa Transport and Communications Commission) est présentée dans le guide pratique qui a été développé en Afrique du Sud récemment. [8]. Il s'agit d'un catalogue basé fondamentalement sur l'expérience du TRRL britannique, mais qui contrairement à celui-ci différencie le dimensionnement selon les régions climatiques. Les valeurs des classes de portance et du trafic sont les mêmes que celles du guide TRRL.

CHART D1 : Granular base / granular subbase Dry Regions

Traffic Class and Traffic Units (million ESAs)

Subgrade Class	T1		T2		T3		T4		T5		T6		T7		T8		
	0.3	0.3	0.7	0.7	1.3	1.3	3	3	8	8	10	10	17	17	30	30	
S1 1%																	
S2 3-4%																	
S3 6-7%																	
S4 8-14%																	
S5 15-20%																	
S6 >20%																	

Figure 24 - Structures de chaussées souples, selon le Catalogue SATCC

Pour une chaussée située dans une zone climatique sèche, le catalogue propose les structures présentées à la Figure 24.

Les structures proposées pour une classe de trafic T1 (trafic cumulé < 300.000 PL) pour une plate-forme type S4 (CBR entre 8 et 14%) sont les suivantes :

- ▶ Dans une zone sèche : ESU sur 15 cm de couche de base granulaire (CBR > 80%) sur **10 cm de couche de fondation** granulaire (CBR > 30%) ;
- ▶ Dans une zone humide : ESU sur 15 cm de couche de base granulaire (CBR > 80%) sur **12,5 cm de couche de fondation** granulaire (CBR > 30%), donc si notre projet se trouve dans une zone climatique humide, l'épaisseur de la couche de fondation doit être augmenté avec 25mm.

3.5.4 Méthode Allemande -RStO R1 - édition 12

Le catalogue de structures allemand [20] permet le dimensionnement de chaussées neuves et du renforcement de structures de chaussées en matériaux bitumineux et en béton pour des routes urbaines et rurales, ainsi que pour voies de bus, pistes cyclables, zones piétonnes, zones de parkings et aires de service.

Dans le cas du dimensionnement d'une route avec multiples voies, le catalogue préconise de retenir la même structure pour toutes les voies. La structure doit être celle qui correspond au trafic de la voie la plus chargée.

Le choix des structures proposées par le catalogue est basé sur le niveau de trafic, le type de route (urbaine ou rural, plusieurs voies) et la localisation de la route (zone climatique), les conditions du sol support/plateforme (portance et protection au gel).

Le classes de trafic sont présentées dans le tableau suivant :

Table 1: Relevant design traffic and assigned load class
(see also annex 1)

Relevant design traffic Equivalent 10-t-standard axles (millions of ESALs)		Load class
Above	32 ¹⁾	Bk100
From	10 to 32	Bk32
From	3.2 to 10	Bk10
From	1.8 to 3.2	Bk3.2
From	1.0 to 1.8	Bk1.8
From	0.3 to 1.0	Bk1.0
	to 0.3	Bk0.3

Tableau 16 - Classes de trafic

Le catalogue est basé sur une méthode empirique, résultante d'observations sur le terrain de l'évolution de la performance des chaussées par rapport au trafic et des résultats des recherches afin d'estimer le comportement de différents types de chaussées par des simulations numériques.

Le catalogue propose 4 familles de structures en fonction du trafic :

- ▶ Structures avec couche de roulement en matériaux bitumineux sur plateforme F2 et F3 (Plate 1) ;
- ▶ Structures avec couche de roulement en béton sur plateforme F2 et F3 (Plate 2) ;
- ▶ Structures avec couche de roulement en pavés (Plate 3) ;
- ▶ Structure composée d'un seul type de matériaux, soit totalement en matériaux bitumineux, soit totalement en matériaux aux liants hydrauliques (Plate 4).

Le catalogue allemand classe les sols en fonction de leur susceptibilité au gel (F1- insensible au gel, F2 – sensibilité faible à moyenne et F3-très sensible au gel). La portance minimale EV2 que la plateforme doit présenter est de 45 MPa.

Le guide propose également la profondeur de gel en fonction du type de sol support (vis-à-vis de la sensibilité au gel) et de la classe de trafic pour les sols F2 et F3. Pour les sols type F1, le besoin d'une épaisseur supplémentaire (du même matériau ou couche en matériau résistant au gel) sera nécessaire en fonction de l'EV2 (Figure 22). Si l'EV2 ≥ 120 MPa pour un trafic de

classe Bk1.0 à Bk100 ou $E_{v2} \geq 100$ MPa pour un trafic de classe Bk0.3, la structure de la chaussée peut être mise en œuvre directement sur la plateforme. - .

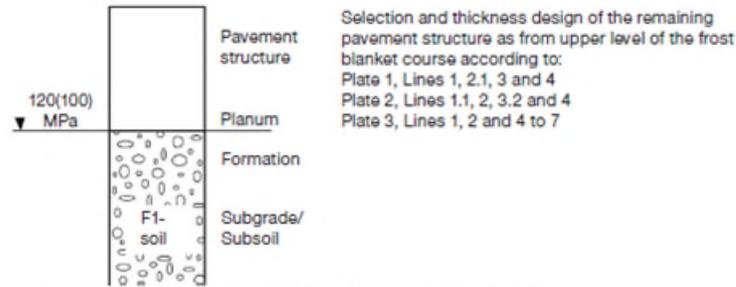


Figure 4: Structures on F1-soil with $E_{v2} \geq 120$ MPa (for load class Bk0.3 $E_{v2} \geq 100$ MPa)

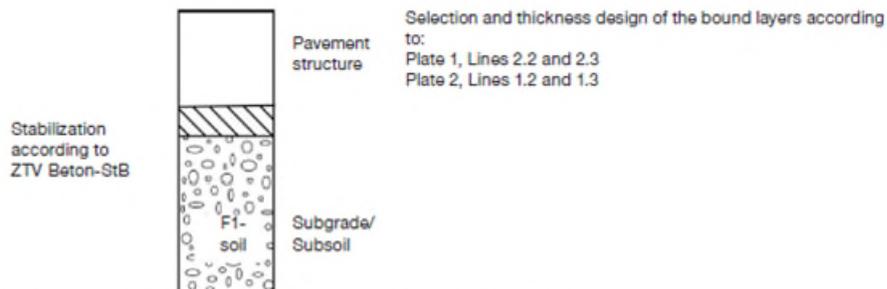


Figure 5: Structures on F1-soil with stabilization according to ZTV Beton-StB

Figure 25 - Structure F1 avec $E_{v2} \geq 120$ MPa)

Il doit cependant présenter le degré de compactage requis.

Table 6: Initial values for determination of the minimum thickness of the frost resistant pavement structure

Frost susceptibility class	Thickness in cm for load class		
	Bk100 to Bk10	Bk3.2 to Bk1.0	Bk0.3
F2	55	50	40
F3	65	60	50

Tableau 17 - Épaisseur minimale pour la protection au gel/dégel en fonction de la classe de trafic

Les épaisseurs présentées dans le tableau précédent peuvent être augmentées ou réduites (A+B+C+D+E) en fonction de zone climatique dans laquelle la chaussée se situe (tableau 18 et figure 23).

Table 7: Additional or reduced thicknesses due to local conditions

Local conditions		A	B	C	D	E
Frost action	Zone I	± 0 cm				
	Zone II	+ 5 cm				
	Zone III	+15 cm				
Local climatic variations	Unfavourable climatic influences, e.g. northern slope or ridge locations in mountains		+ 5 cm			
	No special climatic influences		± 0 cm			
	Favourable climatic influences with closed side construction along the road		- 5 cm			
Water conditions in the subsoil	No groundwater or stratum water at a depth of ≤ 1.5 m below formation			± 0 cm		
	Permanent or occasional groundwater or stratum water higher than 1.5 m below formation			+ 5 cm		
Vertical position of the road surface	Cutting or side-cut				+ 5 cm	
	At-grade and up to embankment ≤ 2.0 m high				± 0 cm	
	Embankment > 2.0 m high				- 5 cm	
Carriageway drainage/ execution of boundary areas	Drainage of carriageway using troughs, ditches or slopes					± 0 cm
	Drainage of carriageway and boundary areas using channels or drains and pipelines					- 5 cm

Tableau 18 - Épaisseur à additionner ou réduire en fonction de la zone climatique

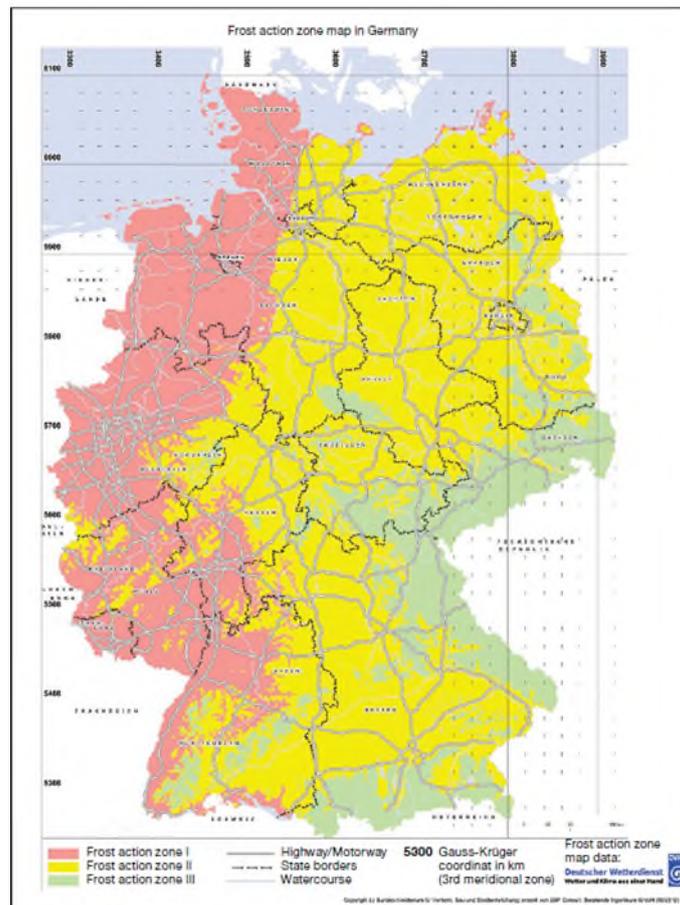


Figure 6: Frost action zones
A detailed version of this map can be downloaded from the website of the Federal Highway Research Institute (www.bast.de) and the FGSV Verlag (www.fgsv-verlag.de).

Figure 26 - Carte des zones climatiques allemandes

Le tableau suivant présente les épaisseurs préconisées dans le catalogue allemand pour la couche d'assise et la couche de protection au gel en matériaux granulaires.

Table 8: Reference values for layer thicknesses required for bearing capacity reasons for unbound granular layers (UGL) according to ZTV SoB-StB depending on the E_{v2} -values of the base and the base course type (thicknesses in cm)

E_{v2} -value [MPa] on the surface of the UGL		80	100	120	150	100	120	150	120	150	180	150	180
		N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
		↑				↑				↑		↑	
Type of UGL	Crushed rock base course [cm]	15*	15*	25	35**	-	20	25	15*	20	30	15*	20
	Gravel base course [cm]	15*	15*	30	50**	-	25	35	20	30	X	20	X
	Frost blanket course [cm] made of predominantly crushed material	15*	20	30	X	15*	25	X	X	X	X	X	X
	Frost blanket course [cm] made of predominantly uncrushed material	20	25	35	X	-	-	X	X	X	X	X	X
		↑				↑				↑		↑	
E_{v2} -value [MPa] for base		45				80				100		120	
Base		Formation						Frost blanket course					

⊗ Combination not possible

15* Minimum practical thickness with 0/45

- Combination not commonly used

** Lower thickness also possible with local experience

Tableau 19 - Épaisseur de la couche d'assise en fonction de la portance (matériaux granulaires)

Étant donné que le sujet du présent rapport porte sur les structures souples, seuls les exemples de structures dont l'une des couches d'assise est composée de matériaux granulaires seront présentés. Dans les figures présentées l'on identifie les lignes dont l'une des couches d'assise est composée dans matériau granulaire :

- ▶ Plate 1 : lignes 3, 4 et 5 ;
- ▶ Plate 2 : lignes 3.1 et 3.2 ;
- ▶ Plate 3 : lignes 1, 2 et 3.

Plate 1: Structures with asphalt surface course for carriageways on F2- and F3-subsoil/subgrade
(Thicknesses in cm; E_{T2} minimum values in MPa)

Line	Load class B [million of ESALs]	BK100 > 32	BK32 > 10 - 32	BK10 > 3.2 - 10	BK3.2 > 1.8 - 3.2	BK1.8 > 1.0 - 1.8	BK1.0 > 0.3 - 1.0	BK0.3 ≤ 0.3	
Thickness of frost resistant pavement structure ¹⁾		55 65 75 85	55 65 75 85	55 65 75 85	45 55 65 75	45 55 65 75	45 55 65 75	35 45 55 65	
1	Asphalt base course on frost blanket course								
	Asphalt surface course	12	12	12	10	4	4	4	
	Asphalt base course	22	16	14	12	16	14	10	
	Frost blanket course	45	45	45	45	45	45	45	
Thickness of frost blanket course		37 ²⁾ 41 51	25 ³⁾ 35 45 55	29 ⁴⁾ 38 49 58	32 ⁵⁾ 43 53 59 ⁶⁾	35 45 55	27 37 47 57	21 31 41 51	
2.1	Asphalt base course and base course with hydraulic binders on frost blanket course or layer of non-frost-susceptible material								
	Asphalt surface course	12	12	12					
	Asphalt base course	14	10	8					
	Cement stabilized base course (HBB)	16	15	15					
Thickness of frost blanket course		45	45	45					
2.2	Asphalt base course and base course with hydraulic binders on frost blanket course or layer of non-frost-susceptible material - widely or gap-graded in line with DIN 18190								
	Asphalt surface course	12	12	12	10	4	4	4	
	Asphalt base course	18	14	15	15	15	15	15	
	Stabilized granular material	15	15	15	15	15	15	15	
Thickness of layer of non-frost-susceptible material		10 ⁷⁾ 20 ⁸⁾ 30 40	14 ⁹⁾ 24 34 44	18 ⁹⁾ 28 38 48	10 ⁵⁾ 20 30 40	14 ⁹⁾ 24 34 44	16 ⁹⁾ 26 36 46	6 ⁹⁾ 16 ⁹⁾ 26 36	
2.3	Asphalt base course and base course with hydraulic binders on frost blanket course or layer of non-frost-susceptible material - narrowly graded in line with DIN 18195								
	Asphalt surface course	12	12	12	10	4	4	4	
	Asphalt base course	18	14	15	15	15	15	15	
	Stabilized granular material	20	20	20	20	20	20	20	
Thickness of layer of non-frost-susceptible material		5 ⁸⁾ 15 ⁸⁾ 25 35	9 ⁸⁾ 19 ⁸⁾ 29 39	13 ⁸⁾ 23 33 43	5 ⁸⁾ 15 ⁸⁾ 25 35	14 ⁸⁾ 24 34 44	16 ⁸⁾ 26 36 46	6 ⁸⁾ 16 ⁸⁾ 26 36	
3	Asphalt base course and crushed rock base course on frost blanket course								
	Asphalt surface course	12	12	12	10	4	4	4	
	Asphalt base course	18	14	15	15	15	15	15	
	Crushed rock base course ⁷⁾ $E_{T2} \geq 150(100)$	15	15	15	15	15	15	15	
Thickness of frost blanket course		45	45	45	45	45	45	45	
4	Asphalt base course and gravel base course on frost blanket course								
	Asphalt surface course	12	12	12	10	4	4	4	
	Asphalt base course	16	14	16	10	20	20	20	
	Gravel base course $E_{T2} \geq 150(100)$	20	20	20	20	20	20	20	
Thickness of frost blanket course		45	45	45	45	45	45	45	
5	Asphalt base course and crushed rock or gravel base course on layer of non-frost-susceptible material								
	Asphalt surface course	12	12	12	10	4	4	4	
	Asphalt base course	16	14	16	10	20	20	20	
	Crushed rock or gravel base course	30 ⁸⁾	30 ⁸⁾	30 ⁸⁾	30 ⁸⁾	30 ⁸⁾	30 ⁸⁾	30 ⁸⁾	
Thickness of layer of non-frost-susceptible material		Above 15 cm made of non-frost-susceptible material, lower remaining thickness is to be compensated by the material above							

¹⁾ For other thicknesses of the frost resistant pavement structure, the thickness of the frost blanket course or of the layer of non-frost susceptible material needs to be adjusted or recalculated as well, see also Table 8
²⁾ With gravel, only applicable with local experience
³⁾ Only applicable with crushed rock and local experience
⁴⁾ Only to be executed if the frost resistant material and the material to be stabilized is installed as one layer
⁵⁾ For gravel base course in load classes BK3.2 to BK100 with 40 cm thickness, and in load classes BK0.3 and BK1.0 with 30 cm thickness
⁶⁾ Alternative: Asphalt base and surface layer can be used as set out in Section 3.3.3
⁷⁾ Alternative: Reduction of asphalt base course by 2 cm with 20 cm thick crushed rock base course and $E_{T2} \geq 180$ MPa (in load classes BK1.8 to BK100) or $E_{T2} \geq 150$ MPa (in other classes)

Figure 27 - Catalogue Allemand RStO - Plate 1

Plate 2: Structures with concrete surface course for carriageways on F2- and F3-subsoil/subgrade
(Thicknesses in cm; σ_{min} - E_{v2} minimum values in MPa)

Line	Load class	BK100	BK32	BK10	BK3.2	BK1.8	BK1.0	BK0.3
	B [million of ESALs]	> 32	> 10 - 32	> 3.2 - 10	> 1.8 - 3.2	> 1.0 - 1.8	> 0.3 - 1.0	≤ 0.3
	Thickness of frost resistant pavement structure ¹⁾	55 65 75 85	55 65 75 85	55 65 75 85	45 55 65 75	45 55 65 75	45 55 65 75	35 45 55 65
Base course with hydraulic binders on frost blanket course or layer of non-frost-susceptible material								
1.1	Concrete surface course	27	26	25	24	23		
	Non-woven fabric ²⁾	15	15	15	15	15		
	Hydraulically bound base course (HBB)	42	41	40	39	38		
	Frost blanket course	45	45	45	45	45		
	Thickness of frost blanket course	33 ³⁾ 43	24 ⁴⁾ 34 44	25 ⁵⁾ 35 45	26 ⁶⁾ 36	27 ⁷⁾ 37		
1.2	Concrete surface course	27	26	25	24	23		
	Non-woven fabric ²⁾	20	15	15	15	15		
	Stabilized granular material layer of non-frost-susceptible material - widely or gap-graded in line with DIN 18196	47	41	40	39	38		
	Thickness of layer of non-frost-susceptible material	8 ⁸⁾ 18 ⁹⁾ 28 38	14 ¹⁰⁾ 24 34 44	15 ¹¹⁾ 25 35 45	8 ¹²⁾ 16 26 36	27 ⁷⁾ 37		
1.3	Concrete surface course	27	26	25	24	23	20	20
	Non-woven fabric ²⁾	25	20	20	20	20	15	15
	Stabilized granular material layer of non-frost-susceptible material - narrowly graded in line with DIN 18196	52	46	45	44	43	35	35
	Thickness of layer of non-frost-susceptible material	3 ¹³⁾ 13 ¹⁴⁾ 23 33	9 ¹⁵⁾ 19 29 39	10 ¹⁶⁾ 20 30 40	11 ¹⁷⁾ 21 31	21 ¹⁸⁾ 31 41	10 ¹⁹⁾ 20 30 40	10 ²⁰⁾ 20 30
Asphalt base course on frost blanket course								
2	Concrete surface course	26	25	24	23	22		
	Asphalt base course	10	10	10	10	8		
	Frost blanket course	45	45	45	45	45		
	Thickness of frost blanket course	29 ²¹⁾ 39 49	30 ²²⁾ 40 50	31 ²³⁾ 41 51	32 ²⁴⁾ 42	33 ²⁵⁾ 43 45		
Crushed rock base course on layer of non-frost-susceptible material								
3.1	Concrete surface course	29	28	27	26	24		
	Crushed rock base course	30 ²⁶⁾	30 ²⁷⁾	30 ²⁸⁾	30 ²⁹⁾	30 ³⁰⁾		
	Layer of non-frost-susceptible material	59	58	57	56	54		
	Thickness of layer of non-frost-susceptible material	Above 12 cm made of non-frost-susceptible material, lower remaining thickness is to be compensated by the material above						
Crushed rock base course on frost blanket course								
3.2	Concrete surface course	25	26	27	26	24		
	Crushed rock base course	20	20	20	20	20		
	Frost blanket course	48	48	47	46	44		
	Thickness of frost blanket course	26 ³¹⁾ 36	27 ³²⁾ 37	28 ³³⁾ 38	29 ³⁴⁾ 39	31 ³⁵⁾ 41		
Frost blanket course								
4	Concrete surface course					21	21	
	Frost blanket course					45	45	
	Thickness of frost blanket course	24 ³⁶⁾ 34 44 54	14 ³⁷⁾ 24 34 44					

¹⁾ For other thicknesses of the frost-resistant pavement structures, the thickness of the frost blanket course or of the layer of non-frost-susceptible material needs to be adjusted or recalculated as well, see also Table 8

²⁾ With gravel, only applicable with local experience

³⁾ Only applicable with crushed and local experience

⁴⁾ Only to be executed if the non-frost-susceptible material and the material to be stabilized are installed as one layer

⁵⁾ Instead of the non-woven fabric, an asphalt intermediate course can be selected, see Section 3.3.4

⁶⁾ With local experience 25 cm

Figure 28 - Catalogue Allemand RStO - Plate 2

3.6 Modélisation de la plate-forme

La portance du sol support est généralement considérée comme l'un des facteurs les plus importants dans le dimensionnement des chaussées. Le type de la plate-forme retenu dans le dimensionnement est caractérisé par son module à long terme ; celui-ci dépend du type de sol, de la densité et des conditions d'humidité lors de la construction et pendant la durée de service.

Il existe un ensemble de méthodes d'essais directes et indirectes qui permettent d'évaluer la portance du matériau de sol support. Néanmoins ces méthodes sont généralement basées sur des corrélations semi-empiriques qui présentent une grande variabilité. C'est pourquoi une combinaison de ces méthodes est nécessaire afin de croiser les résultats d'essais à la fois :

- ▶ de CBR en laboratoire, sachant que les mesures de CBR sur le site sont difficiles à réaliser et ne peuvent être considérées que comme des compléments à d'autres essais ;
- ▶ de portance à l'essai à la plaque EV2 ;
- ▶ de portance sur le chantier par des mesures de déflexion
 - à la poutre Benkelman ; ou
 - ou au déflectographe sous l'essieu de 130 kN ; ou
 - au FWD (Falling Weight Deflectometer) qui permettent de définir un bol de déflexion et de rétrocalculer le module de la plateforme de chaussée avec des logiciels spécialisés comme ELMOD développé par Dynatest, ce type de rétrocalcul peut également être effectué par Alize ;
- ▶ et des essais pénétrométriques au DCP (Dynamic Cone Penetrometer).

Ce paragraphe décrit les différentes hypothèses liées à la modélisation de la plate-forme dans le référentiels listées dans le chapitre 2.

3.6.1 Coefficient de Poisson

Le coefficient de poisson est une propriété des matériaux qui correspond au rapport entre la déformation transversale et longitudinale quand ces matériaux sont sollicités par un chargement uni-axial. Les valeurs pour le Coefficient de Poisson des matériaux utilisés composant la plateforme support de chaussée sont les suivantes :

N°	Méthode	Coefficient de Poisson																		
[3]	Australienne	Matériaux cohésifs = 0.45 Matériaux sans cohésion = 0.35																		
[6]	Algérienne	Couche de forme = 0.35																		
[7]	Française	Matériaux en général = 0.35 Substratum rocheux = 0.25																		
[12]	Sénégalaise	Matériaux en général = 0.35 Latérite traitée, banco-coquillage traité = 0,25																		
[22]	Belge	<table border="1"> <thead> <tr> <th>MATERIAUX</th> <th>MODULES (MPa)</th> <th>COEFFICIENTS DE POISSON</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Couches hydrocarbonées</td> <td>25.000 en hiver (*) 5.000 en été 10.000 au printemps et en automne</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>Couche d'empierrement</td> <td>500 (**)</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>Couche en béton maigre</td> <td>15.000 (**)</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>Sous-fondation granulaire</td> <td>200 (**)</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>Sol</td> <td>a été considéré comme paramètre (**)</td> <td>0,5</td> </tr> </tbody> </table> <p>(*) module viscoélastique fonction de la température et de la fréquence de la sollicitation (elle correspond à une vitesse de circulation de 60 km/h). (**) module d'élasticité (déformation réversible) indépendant de la température et de la fréquence de la sollicitation.</p>	MATERIAUX	MODULES (MPa)	COEFFICIENTS DE POISSON	Couches hydrocarbonées	25.000 en hiver (*) 5.000 en été 10.000 au printemps et en automne	0,3	Couche d'empierrement	500 (**)	0,5	Couche en béton maigre	15.000 (**)	0,3	Sous-fondation granulaire	200 (**)	0,5	Sol	a été considéré comme paramètre (**)	0,5
MATERIAUX	MODULES (MPa)	COEFFICIENTS DE POISSON																		
Couches hydrocarbonées	25.000 en hiver (*) 5.000 en été 10.000 au printemps et en automne	0,3																		
Couche d'empierrement	500 (**)	0,5																		
Couche en béton maigre	15.000 (**)	0,3																		
Sous-fondation granulaire	200 (**)	0,5																		
Sol	a été considéré comme paramètre (**)	0,5																		

Tableau 20 – Coefficient de poisson

3.6.2 Module de la plate-forme

Il existe des nombreux facteurs qui doivent être pris en considération dans la détermination de la portance du sol support. La liste suivante est issue du guide Austroads [3] :

- ▶ La variabilité du sol ;
- ▶ Les conséquences d'une chute de portance prématurée ;
- ▶ Le phasage des travaux de terrassement ;
- ▶ La teneur en eau du compactage cible et la densité obtenue sur le site ;
- ▶ Les changements d'humidité pendant la durée de vie de la chaussée ;
- ▶ Le profil transversal de la chaussée ;
- ▶ La présence de couches faible au-dessous de la plate-forme.

La teneur en eau des matériaux granulaires durant les travaux est souvent différente de celle retenue en laboratoire pour déterminer la valeur de CBR à long terme.

Selon le module de la plateforme, différentes classes sont définies dans les référentiels utilisées : ces classes sont présentées dans le tableau ci-dessous. Les valeurs de portance à long terme (E) dans le tableau ci-dessous sont affichées en MPa et les valeurs de déflexions (d) en 1/100 mm. :

N°	Méthode	Classe de la plate - forme																																						
		Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 2	Classe 2																																		
[2]	CEBTP	S1 E = 25	S2 E = 50	S3 E = 75	S4 E = 150	S5 E = 300																																		
[5]	DMRB		Classe 1 E = 50	Classe 2 E = 100	Classe 3 E = 200	Classe 4 E = 400																																		
[6]	Algérienne	S4 E = 14	S3 E = 25	S2 E = 50	S1 E = 125	S0 E = 200																																		
[7]	Française	PF1 E = 20	PF2 E = 50	PF23 E = 80	PF3 E = 120	PF4 E = 200																																		
[11]	Espagnole		E1 EV2>60 d ≤ 250	E2 EV2>120 d ≤ 200		E3 EV2>300 d ≤ 150																																		
[12]	Sénégalaise	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Classe</th> <th>PF1</th> <th>PF2</th> <th>PF2qs</th> <th>PF3</th> <th>PF4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Long terme (dimensionnement)</td> <td>E min (MPa)</td> <td>20</td> <td>50</td> <td>80</td> <td>120</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td></td> <td>EV2 min (MPa)</td> <td>30</td> <td>80</td> <td>100</td> <td>120</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Court terme (réception chantier)</td> <td>Déflexion maxi (100^e mm)</td> <td>300 (non traitée)</td> <td>200 (non traitée) 80 (chaux/ciment)</td> <td>120 (non traitée) 70 (chaux/ciment)</td> <td>90 (non traitée) 60 (chaux/ciment)</td> <td>50 (chaux/ciment)</td> </tr> <tr> <td>CBR min (%)</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>15</td> <td>25 (peu significatif)</td> <td>40 (peu significatif)</td> </tr> </tbody> </table>						Classe	PF1	PF2	PF2qs	PF3	PF4	Long terme (dimensionnement)	E min (MPa)	20	50	80	120	200		EV2 min (MPa)	30	80	100	120	200	Court terme (réception chantier)	Déflexion maxi (100 ^e mm)	300 (non traitée)	200 (non traitée) 80 (chaux/ciment)	120 (non traitée) 70 (chaux/ciment)	90 (non traitée) 60 (chaux/ciment)	50 (chaux/ciment)	CBR min (%)	5	10	15	25 (peu significatif)	40 (peu significatif)
	Classe	PF1	PF2	PF2qs	PF3	PF4																																		
Long terme (dimensionnement)	E min (MPa)	20	50	80	120	200																																		
	EV2 min (MPa)	30	80	100	120	200																																		
Court terme (réception chantier)	Déflexion maxi (100 ^e mm)	300 (non traitée)	200 (non traitée) 80 (chaux/ciment)	120 (non traitée) 70 (chaux/ciment)	90 (non traitée) 60 (chaux/ciment)	50 (chaux/ciment)																																		
	CBR min (%)	5	10	15	25 (peu significatif)	40 (peu significatif)																																		
[20]	Allemande	Dans le catalogue allemand toutes les structures sont dimensionnées en considérant un EV2 ≥ 45 MPa. Il n'y a donc pas vraiment de classement. Le classement porte plutôt sur la sensibilité au gel des sols (F1, F2 et F3).																																						

Le module du sol est déterminé à partir du type de sol et de ses conditions de drainabilité. Il n'y a pas des classes de plateforme bien définies, même si des tranches de EV2 sont définies (10 MPa, 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa, 60 MPa et 80 MPa) :

Sol (Symbole de base cf. figure 1)	Drainabilité du sol			
	Sol sec à très sec drainage favorable	Drainage modéré et imparfait	Sol humide à nappe permanente ou oscillante	Sol très humide à extrêmement humide à nappe permanente
Z, S, P, L	40	40	20	≤ 10
A, E	40	20	≤ 10	≤ 10
U	20	≤ 10	≤ 10	≤ 10

Remarques: 1°) Dans le sol de plusieurs horizons superposés, la valeur du module à retenir est celle qui correspond à l'horizon le plus défavorable.

2°) Les sols améliorés et les remblais rocheux sont caractérisés par un module de 80 MPa.

Symboles: Z ↔ sable
S ↔ sable limoneux
P ↔ limon sableux léger
L ↔ limon sableux
A ↔ limon
E ↔ argile
U ↔ argile lourde

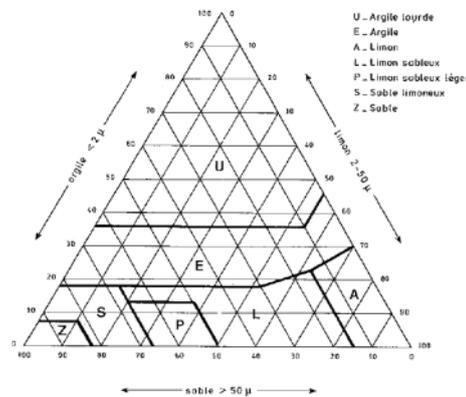


Fig. 7 Granulométrie des sols (graphique triangulaire)

DRA 13554

Tableau 21 – Classes de la Plate -forme

Le CBR n'étant pas un paramètre intrinsèque, il n'existe pas de corrélation unique avec le module E. Plusieurs méthodes présentent des corrélations pour déterminer la portance de la plateforme **en fonction du CBR**:

- ▶ Méthode anglaise DMRB : $E \text{ (MN/m}^2\text{)} = 17,6 \text{ CBR}^{0,64}$
- ▶ Austroads : $E = 10 \times \text{CBR}$, avec max = 150 MPa (attention particulière à la densité et w d'essai) ;
- ▶ Catalogue Algérien : $E = 5 \times \text{CBR (MPa)}$;
- ▶ Catalogue du Sénégal : $E = 5 \times \text{CBR (MPa)}$;
- ▶ AASHTO :
 - $\text{MR (psi)} = 750 \text{ à } 3000 \times \text{CBR}$;
 - $\text{MR (psi)} = 1500 \times \text{CBR}$ si $\text{CBR} < 10\%$, soit $\text{MR (MPa)} = 10.3 \times \text{CBR}$;
 - $\text{MR (psi)} = 2555 \times \text{CBR}^{0,64}$ si matériaux fins soit $\text{MR (MPa)} = 17.6 \times \text{CBR}^{0,64}$
 - $\text{MR (psi)} = 3000 \times \text{CBR}^{0,65}$ soit $\text{MR (MPa)} = 20.7 \times \text{CBR}^{0,65}$ [AASHTO 2002].
- Méthode Belge : $E = 10 \times \text{CBR (MPa)}$

Le catalogue algérien et le Guide CEBTP présentent des corrélations pour déterminer la portance de la plateforme **en fonction de l'EV2 ou de la déflexion in situ** :

- ▶ $\text{EV2} = \text{déflexion caractéristique} \times 10340$ pour matériaux insensibles à l'eau et grenus ;

- Déflexion inférieure à 200 1/100 mm ou EV2 < 50MPa à court terme sur chantier.

Le graphique suivant présente les différentes corrélations pour déterminer le module du sol support :

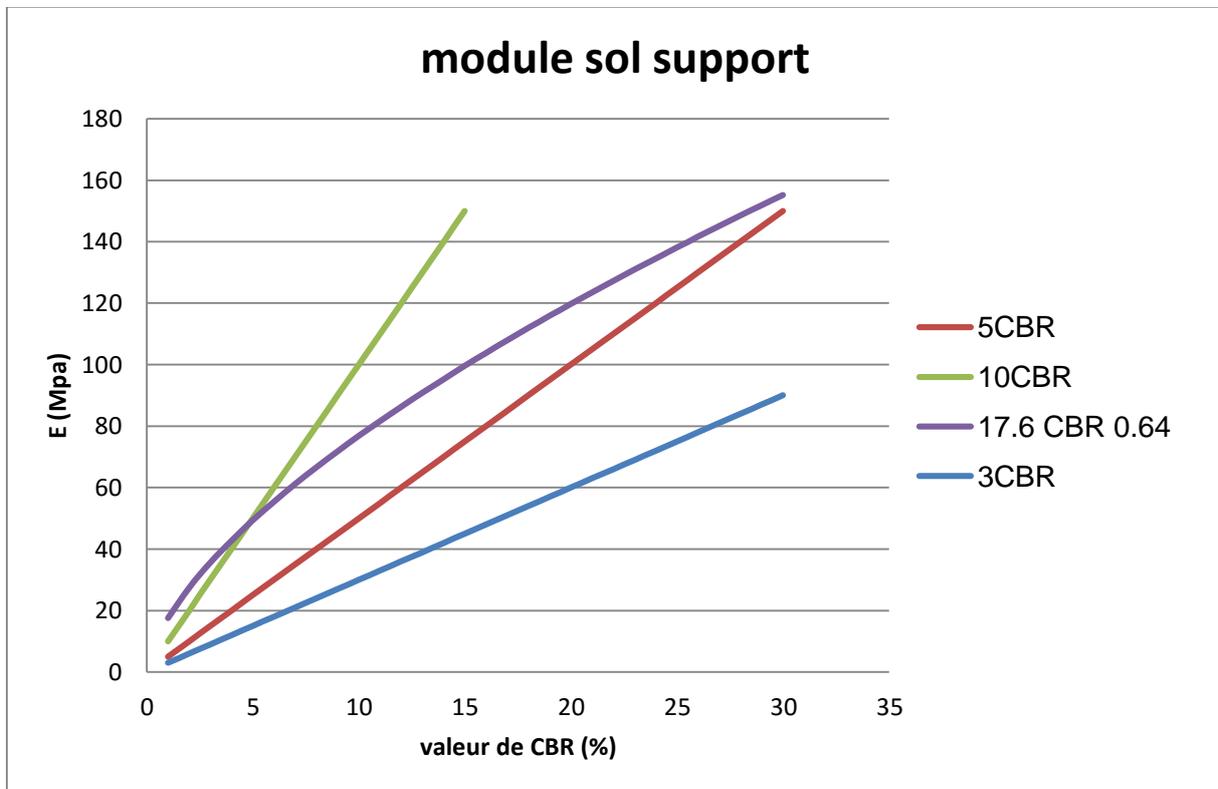


Figure 29 - Évolution du module E du sol support en fonction de son CBR

Comme l'illustre le figure ci-dessous, en utilisant les différentes équations, le module du sol peut être assez différent pour la même valeur du CBR. La formule $E = \text{CBR} \times 3$ est assez conservatrice, à l'inverse la formule $E = \text{CBR} \times 10$ qui est assez optimiste, surtout pour les valeurs de CBR > 5.

Les deux courbes au milieu du graphique correspondent aux formules $E = \text{CBR} \times 5$ et $E = 17,6 \text{ CBR}^{0,64}$ qui donnent des modules du sol assez proches. Pour une valeur de CBR = 10, la portance serait 50MPa ou 77MPa. Cette différence, qui ne semble pas trop importante, peut cependant avoir une conséquence significative pour la structure de chaussée.

La surestimation de la qualité portante du sol a pour conséquence une chaussée sous dimensionnée, donc une dégradation structurelle prématurée. Cependant, il ne faut pas par défaut choisir une portance trop pessimiste non plus, car une chaussée sur dimensionnée, entraîne des coûts financiers importants. Le choix de la portance doit intégrer l'expérience locale des ingénieurs.

Le catalogue du Sénégal [12] apparu en 2015 ; en l'absence d'étude spécifique par matériau dans un contexte géotechnique donné, propose d'utiliser la relation $E \text{ (MPa)} = 5 \text{ CBR}$ même si cette relation est en général assez conservatrice.

3.6.3 CBR

Les référentiels définies les classes des CBR en fonction du résultat obtenu à 95% de la densité OPM et 4 jours d'immersion, le plus souvent.

N°	Méthode	Classes de CBR																								
[1] et [8]	Road Note 31 et Sud-africaine	<ul style="list-style-type: none"> ▶ S1 = 2% ▶ 3% ≤ S2 ≤ 4% ▶ 5% ≤ S3 ≤ 7% ▶ 8% ≤ S4 ≤ 14% ▶ 15% < S5 ≤ 29% ▶ S6 = 30%. 																								
[2]	CEBTP	<ul style="list-style-type: none"> ▶ S1 < 5% (calculs faits pour CBR = 2) S2 < 10% ▶ S3 < 15% ▶ S4 < 30% ▶ S5 > 30% <p>Si CBR < 5, on substitue sur 50 cm dans la mesure du possible</p>																								
[6]	Algérienne	<ul style="list-style-type: none"> ▶ S1 < 5% ▶ S2 < 10% ▶ S3 < 25% ▶ S4 < 40% ▶ S5 > 40% 																								
[9]	Tanzanienne	<ul style="list-style-type: none"> ▶ S15 > 15 % ▶ S7 > 7 % ▶ S3 > 3 % 																								
[11]	Espagnole	<p>Les sols et les matériaux granulaires sont classés en 7 catégories selon les caractéristiques suivantes (tableau 4 de la norme espagnole) :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cat</th> <th>Nom</th> <th>Caractéristiques</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IN</td> <td>non adapté</td> <td>Sols non utilisables, doivent être traités à la chaux ou au ciment pour obtenir une catégorie S EST-1 ou S EST-2</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>tolérable</td> <td>CBR ≥ 3 ; matière organique ≤ 1% ; sulfate soluble (SO₃) ≤ 1% ; gonflement ≤ 1%</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>adapté</td> <td>CBR ≥ 5 en cas général, CBR ≥ 6 si utilisation en couche supérieure de la plate-forme</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>à sélectionner</td> <td>CBR ≥ 10 en cas général, CBR ≥ 12 si utilisation en couche supérieure de la plate-forme</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>à sélectionner</td> <td>CBR ≥ 20</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>roches</td> <td></td> </tr> <tr> <td>S EST-1 S EST 2 S EST 3</td> <td>sol traité sur place à la chaux ou au ciment</td> <td>Épaisseur minimum 25 cm épaisseur minimum 35 cm</td> </tr> </tbody> </table>	Cat	Nom	Caractéristiques	IN	non adapté	Sols non utilisables, doivent être traités à la chaux ou au ciment pour obtenir une catégorie S EST-1 ou S EST-2	0	tolérable	CBR ≥ 3 ; matière organique ≤ 1% ; sulfate soluble (SO ₃) ≤ 1% ; gonflement ≤ 1%	1	adapté	CBR ≥ 5 en cas général, CBR ≥ 6 si utilisation en couche supérieure de la plate-forme	2	à sélectionner	CBR ≥ 10 en cas général, CBR ≥ 12 si utilisation en couche supérieure de la plate-forme	3	à sélectionner	CBR ≥ 20	R	roches		S EST-1 S EST 2 S EST 3	sol traité sur place à la chaux ou au ciment	Épaisseur minimum 25 cm épaisseur minimum 35 cm
Cat	Nom	Caractéristiques																								
IN	non adapté	Sols non utilisables, doivent être traités à la chaux ou au ciment pour obtenir une catégorie S EST-1 ou S EST-2																								
0	tolérable	CBR ≥ 3 ; matière organique ≤ 1% ; sulfate soluble (SO ₃) ≤ 1% ; gonflement ≤ 1%																								
1	adapté	CBR ≥ 5 en cas général, CBR ≥ 6 si utilisation en couche supérieure de la plate-forme																								
2	à sélectionner	CBR ≥ 10 en cas général, CBR ≥ 12 si utilisation en couche supérieure de la plate-forme																								
3	à sélectionner	CBR ≥ 20																								
R	roches																									
S EST-1 S EST 2 S EST 3	sol traité sur place à la chaux ou au ciment	Épaisseur minimum 25 cm épaisseur minimum 35 cm																								

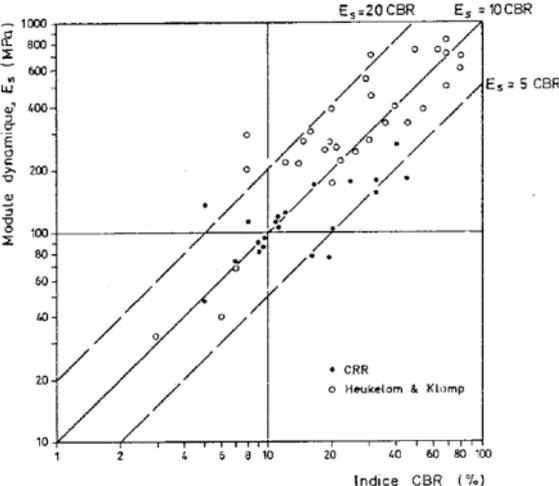
[21]	Japonaise	<p>Une fois le CBR des échantillons mesurés, le CBR de dimensionnement doit être choisi comme suit :</p> <p>Table 2-7 Relationship between the CBR of each section and the design CBR</p> <table border="1" data-bbox="710 331 1273 573"> <thead> <tr> <th>CBR of each section</th> <th>Design CBR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(2 or more but smaller than 3)</td> <td>(2)</td> </tr> <tr> <td>3 or more but smaller than 4</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>4 or more but smaller than 6</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>6 or more but smaller than 8</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>8 or more but smaller than 12</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>12 or more but smaller than 20</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>20 or more</td> <td>20</td> </tr> </tbody> </table> <p>[Note] Conditions in parentheses () are applied if it is impossible to construct a modified subgrade when the CBR of the axis subgrade is 2 in replacement or other construction work.</p>	CBR of each section	Design CBR	(2 or more but smaller than 3)	(2)	3 or more but smaller than 4	3	4 or more but smaller than 6	4	6 or more but smaller than 8	6	8 or more but smaller than 12	8	12 or more but smaller than 20	12	20 or more	20
CBR of each section	Design CBR																	
(2 or more but smaller than 3)	(2)																	
3 or more but smaller than 4	3																	
4 or more but smaller than 6	4																	
6 or more but smaller than 8	6																	
8 or more but smaller than 12	8																	
12 or more but smaller than 20	12																	
20 or more	20																	
[22]	Belge	<p>Même si les modules des matériaux peuvent être directement mesurés et corrélés à la nature des matériaux, la méthode belge propose également la formule « $E_s = 10 \times \text{CBR (MPa)}$ » ou par l'abaque corrélation module dynamique E_s x l'indice CBR des sols présenté ci-dessous :</p> 																

Tableau 22 - Classes du CBR

La valeur de CBR retenue correspond à :

- ▶ Référence [2]: la valeur la plus fréquente ;
- ▶ Références [1] [1] [9] [10] [12]: la valeur de CBR telle que 90% au moins du nombre total de mesures lui soit inférieures ou égales (fonction centile 0.9 dans Excel).
- ▶ Le catalogue de Sénégal [12] propose à retenir en fonction de la région climatique du projet d'autres modalités d'essais, par exemple :

Teneur en eau :

- 0.8 wOPM si pluviométrie < 250 mm /an (Nord du Sénégal) ;
- wOPM si pluviométrie 250 à 800 mm/an ;
- 1.15 wOPM si pluviométrie > 800 mm/an (région de Casamance et zone Est).
- ▶ Dans le cas particulier des sols en déblais, la valeur à retenir est la valeur maximale obtenue sur l'ensemble des échantillons [9]

CBR en fonction du Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

Si les sondages ne peuvent pas être réalisés ou lorsque les matériaux du sol support sont inaccessibles lors de l'étude de réfection de chaussée, les mesures au DCP permettront d'évaluer le CBR du matériau en place. Il est recommandé d'avoir trois essais DCP par section homogène pour l'exploitation [9].

De nombreuses relations ont été établies entre le résultat du DCP in situ (ASTM D 6951-03) et le CBR du matériau. Ces relations peuvent être utilisées en première approche sous chaussée existante revêtue et restent à confirmer [1]. Le prélèvement et la mesure du CBR sur le matériau lui-même reste plus fiable en l'absence de calibrage avec les matériaux in situ. Outre les relations de Mulholland, Schofield, de la norme ASTM D6951-03, on trouve également [1]:

- ▶ $\text{Log}_{10} \text{ CBR} = 2.632 - 1.28 \log_{10} \text{ mm/blow}$ - Kleyn and van Heerden 60° cone
- ▶ $\text{Log}_{10} \text{ CBR} = 2.555 - 1.145 \log_{10} \text{ mm/blow}$ - Smith and Pratt 30° cone
- ▶ $\text{Log}_{10} \text{ CBR} = 2.503 - 1.15 \log_{10} \text{ mm/blow}$ - Van Vuuren 30° cone
- ▶ $\text{Log}_{10} \text{ CBR} = 2.48 - 1.057 \log_{10} \text{ mm/blow}$ - TRL note 8 60° cone
- ▶

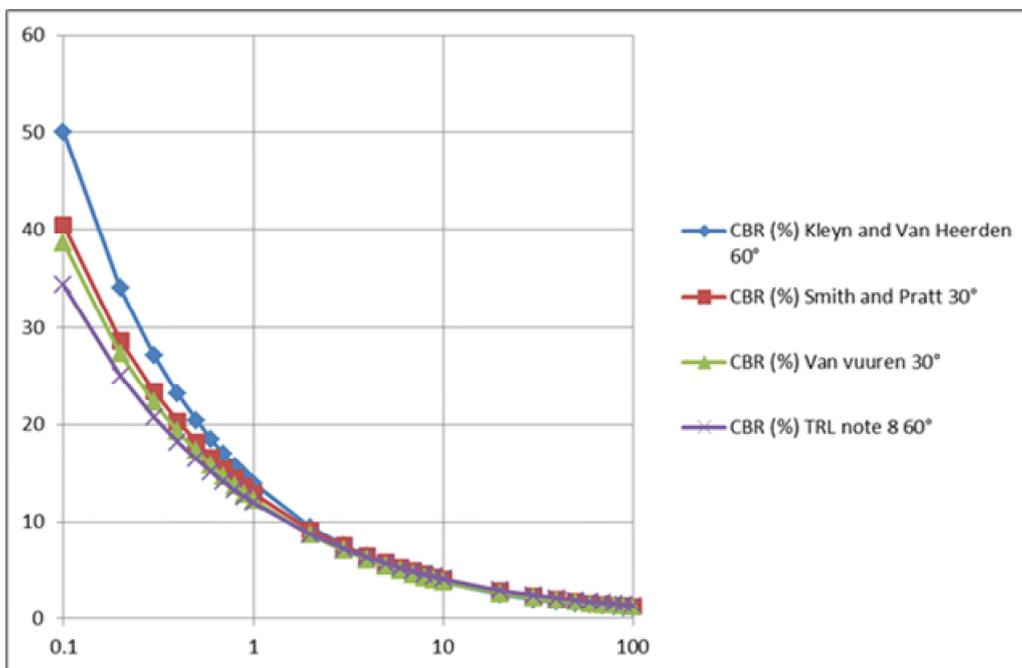


Figure 30 - Évolution du CBR d'un sol en fonction des résultats du DCP (mm/blow)

Ces relations fournissent des valeurs de CBR identiques pour les valeurs d'enfoncement par coup les plus fortes. Pour un dimensionnement on pourra retenir la relation du TRL qui fournit les valeurs de CBR les plus sécuritaires pour les valeurs d'enfoncement les plus faibles.

Dans la littérature on trouve plusieurs relations entre l'indice DCP et la valeur CBR. Le rapport Élaboration de modèles mathématiques pour l'interprétation des données obtenues avec le pénétromètre dynamique liste des équations suivantes.

Tableau 3
Corrélations DCPI-CBR

Chercheurs	Équation de corrélation	Matériel testé
Kleyn (1975)	$\log(\text{CBR}) = 2,62 - 1,27 \log(\text{DCPI})$	Inconnu
Smith et Pratt (1983)	$\log(\text{CBR}) = 2,56 - 1,16 \log(\text{DCPI})$	Inconnu
Livneh (1987)	$\log(\text{CBR}) = 2,56 - 1,16 \log(\text{DCPI})$	Granulaire et cohésif
Harison (1989)	$\log(\text{CBR}) = 2,55 - 1,14 \log(\text{DCPI})$	Granulaire et cohésif
Livneh <i>et al.</i> (1992)	$\log(\text{CBR}) = 2,45 - 1,12 \log(\text{DCPI})$	Granulaire et cohésif
Webster <i>et al.</i> (1992)	$\log(\text{CBR}) = 2,46 - 1,12 \log(\text{DCPI})$	Plusieurs types de sols
Ese <i>et al.</i> (1995)	$\log(\text{CBR}) = 2,44 - 1,07 \log(\text{DCPI})$	Structure de chaussée
NCDOT (1998)	$\log(\text{CBR}) = 2,60 - 1,07 \log(\text{DCPI})$	Structure de chaussée et cohésif
Coonse (1999)	$\log(\text{CBR}) = 2,53 - 1,14 \log(\text{DCPI})$	Sol résiduel de Piedmont
Gabr <i>et al.</i> (2000)	$\log(\text{CBR}) = 1,55 - 0,55 \log(\text{DCPI})$	Structure et infrastructure de chaussée
Gabr <i>et al.</i> (2000)	$\log(\text{CBR}) = 1,40 - 0,55 \log(\text{DCPI})$	Structure et infrastructure de chaussée

Source : Drouin, 2004 ; Amini, 2003.

Tableau 23 – Corrélation DCP- CBR

CBR mesuré en laboratoire

Le CBR en laboratoire est fonction de l'humidité (w), de la densité (dame 4.5 kg ou 2.5 kg / taux de compactage) et de sa durée d'immersion éventuelle. Les conditions doivent être représentatives des conditions de la plateforme à long terme.

N°	Méthode	CBR mesuré en laboratoire																		
[1]	Road Note 31	wOPM si > 250mm pluie/an ou wOPM*0.8 sinon.																		
[3]	Australienne	<p>Table 5.3: Typical moisture conditions for laboratory CBR testing</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Median annual rainfall (mm)</th> <th rowspan="2">Specimen compaction moisture content</th> <th colspan="2">Testing condition</th> </tr> <tr> <th>Excellent to good drainage</th> <th>Fair to poor drainage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>< 500</td> <td>OMC</td> <td>Unsoaked to 4-day soak</td> <td>1 to 4-day soak</td> </tr> <tr> <td>500-800</td> <td>OMC</td> <td>Unsoaked to 4-day soak</td> <td>4 to 7-day soak</td> </tr> <tr> <td>> 800</td> <td>1 to 1.15 × OMC</td> <td>Unsoaked to 4-day soak</td> <td>4 to 10-day soak</td> </tr> </tbody> </table>	Median annual rainfall (mm)	Specimen compaction moisture content	Testing condition		Excellent to good drainage	Fair to poor drainage	< 500	OMC	Unsoaked to 4-day soak	1 to 4-day soak	500-800	OMC	Unsoaked to 4-day soak	4 to 7-day soak	> 800	1 to 1.15 × OMC	Unsoaked to 4-day soak	4 to 10-day soak
Median annual rainfall (mm)	Specimen compaction moisture content	Testing condition																		
		Excellent to good drainage	Fair to poor drainage																	
< 500	OMC	Unsoaked to 4-day soak	1 to 4-day soak																	
500-800	OMC	Unsoaked to 4-day soak	4 to 7-day soak																	
> 800	1 to 1.15 × OMC	Unsoaked to 4-day soak	4 to 10-day soak																	
[6]	Algérienne	<p>Une carte de l'Algérie définit 4 zones climatiques par rapport à l'hydrométrie (I au nord, IV au sud) :</p> <p>CBR immergé à 4 jours en zone climatique I et II à 100% dsOPM CBR immédiat en zone climatique III et IV à 95% dsOPM</p>																		

[8]	Sud-africaine	95%dsOPM et wOPM après 4 jours d'immersion si > 250 mm pluie /an, 95%dsOPM et wOPM*0.67+0.8 immédiat si < 250 mm pluie /an (à 24h si IP > 20).																									
[9]	Tanzanienne	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3">Subgrade class</th> <th colspan="3">CBR_{design} [%]</th> <th rowspan="3">Density for determination of CBR_{design} [% of MDD]</th> </tr> <tr> <th rowspan="2">Wet or moderate climatic zones 4 days soaked value</th> <th colspan="2">Dry climatic zones (both requirements shall be met)</th> </tr> <tr> <th>Tested at OMC</th> <th>4 days soaked value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S15</td> <td>Min 15</td> <td>Min 15</td> <td>Min 7</td> <td>95 BS-Heavy</td> </tr> <tr> <td>S7</td> <td>7 - 14</td> <td>7 - 14</td> <td>3 - 14</td> <td>93 BS-Heavy</td> </tr> <tr> <td>S3</td> <td>3 - 6</td> <td>3 - 6</td> <td>2 - 6</td> <td>100 BS-Light</td> </tr> </tbody> </table> <p>Problem soils: Special treatment is required./Chapter 6/ 'Soaked' and 'OMC' refer to standard 4 days soaking and the optimum moisture content determined in accordance with tests CML 1.9 and CML 1.11. Climatic zones are shown in /Figure 2.1/. BS-Light compaction effort is used on poor in-situ soils and deep in-situ soils rather than BS-Heavy due to its better correspondence with the actual effect from compaction equipment under conditions with poor support for compaction. The referred laboratory test methods are CML 1.9 and 1.11.</p>	Subgrade class	CBR _{design} [%]			Density for determination of CBR _{design} [% of MDD]	Wet or moderate climatic zones 4 days soaked value	Dry climatic zones (both requirements shall be met)		Tested at OMC	4 days soaked value	S15	Min 15	Min 15	Min 7	95 BS-Heavy	S7	7 - 14	7 - 14	3 - 14	93 BS-Heavy	S3	3 - 6	3 - 6	2 - 6	100 BS-Light
Subgrade class	CBR _{design} [%]			Density for determination of CBR _{design} [% of MDD]																							
	Wet or moderate climatic zones 4 days soaked value	Dry climatic zones (both requirements shall be met)																									
		Tested at OMC	4 days soaked value																								
S15	Min 15	Min 15	Min 7	95 BS-Heavy																							
S7	7 - 14	7 - 14	3 - 14	93 BS-Heavy																							
S3	3 - 6	3 - 6	2 - 6	100 BS-Light																							

Tableau 24 – CBR mesuré en laboratoire

CBR selon le type du sol

Si l'essai de CBR ne peut pas être réalisé, sa valeur peut être estimée selon la nature du sol support :

N°	Méthode	CBR selon le type du sol																																																	
[3]	Australienne	<p>Table 5.4 Typical presumptive subgrade design CBR values</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Description of subgrade</th> <th colspan="2">Typical CBR values (%)</th> </tr> <tr> <th>Material</th> <th>USC classification</th> <th>Excellent to good drainage</th> <th>Fair to poor drainage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Highly plastic clay</td> <td>CH</td> <td>5</td> <td>2-3</td> </tr> <tr> <td>Silt</td> <td>ML</td> <td>4</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Silty clay</td> <td>CL</td> <td>5-6</td> <td>3-4</td> </tr> <tr> <td>Sandy clay</td> <td>SC</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sand</td> <td>SW, SP</td> <td>10-15</td> <td>5-10</td> </tr> </tbody> </table>	Description of subgrade		Typical CBR values (%)		Material	USC classification	Excellent to good drainage	Fair to poor drainage	Highly plastic clay	CH	5	2-3	Silt	ML	4	2	Silty clay	CL	5-6	3-4	Sandy clay	SC			Sand	SW, SP	10-15	5-10																					
Description of subgrade		Typical CBR values (%)																																																	
Material	USC classification	Excellent to good drainage	Fair to poor drainage																																																
Highly plastic clay	CH	5	2-3																																																
Silt	ML	4	2																																																
Silty clay	CL	5-6	3-4																																																
Sandy clay	SC																																																		
Sand	SW, SP	10-15	5-10																																																
[5]	Analise DMRB	<p>Pour être utilisé, le sol support doit présenter un CBR minimum de 2,5%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">SOIL</th> <th rowspan="2">PI %</th> <th>Thin</th> <th>Thick</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Estimated CBR %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">Heavy Clay</td> <td>70</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>2</td> <td>2.5</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>2.5</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Silty Clay</td> <td>30</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Sandy Clay</td> <td>10</td> <td>3</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Silt*</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sand (poorly graded)</td> <td>-</td> <td></td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Sand (well graded)</td> <td>-</td> <td></td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>Sandy Gravel (well graded)</td> <td>-</td> <td></td> <td>60</td> </tr> </tbody> </table> <p>* estimated assuming some probability of material saturating</p> <p>Notes 1) A thick layered construction is a depth to subgrade of 1200mm 2) A thin layered construction is a depth to subgrade of 300mm</p>	SOIL	PI %	Thin	Thick	Estimated CBR %		Heavy Clay	70	2	2	60	2	2	50	2	2.5	40	2.5	3	Silty Clay	30	3	4	20	4	5	Sandy Clay	10	3	6	-	1	1	Silt*	-			Sand (poorly graded)	-		20	Sand (well graded)	-		40	Sandy Gravel (well graded)	-		60
SOIL	PI %	Thin			Thick																																														
		Estimated CBR %																																																	
Heavy Clay	70	2	2																																																
	60	2	2																																																
	50	2	2.5																																																
	40	2.5	3																																																
Silty Clay	30	3	4																																																
	20	4	5																																																
Sandy Clay	10	3	6																																																
	-	1	1																																																
Silt*	-																																																		
Sand (poorly graded)	-		20																																																
Sand (well graded)	-		40																																																
Sandy Gravel (well graded)	-		60																																																

[6]	Algérienne	<p style="text-align: center;">Tableau 3 : Plages probables de portance des sols</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="background-color: #333; color: white;">Description des sols</th> <th style="background-color: #333; color: white;">Classification européenne (CEN)</th> <th style="background-color: #333; color: white;">Plages de portance (kg/cm²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">Argiles, Limons</td> <td style="text-align: center;">CL, CH, ML, ML-CL</td> <td style="text-align: center;">S4 - S2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Sables, Graves</td> <td style="text-align: center;">SP-SC, SC, SM GP-GC, GC, GM</td> <td style="text-align: center;">S3 - S0</td> </tr> </tbody> </table>	Description des sols	Classification européenne (CEN)	Plages de portance (kg/cm ²)	Argiles, Limons	CL, CH, ML, ML-CL	S4 - S2	Sables, Graves	SP-SC, SC, SM GP-GC, GC, GM	S3 - S0															
Description des sols	Classification européenne (CEN)	Plages de portance (kg/cm ²)																								
Argiles, Limons	CL, CH, ML, ML-CL	S4 - S2																								
Sables, Graves	SP-SC, SC, SM GP-GC, GC, GM	S3 - S0																								
[22]	Belge	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Sol (Symbole de base cf. figure 1)</th> <th colspan="4">Drainabilité du sol</th> </tr> <tr> <th>Sol sec à très sec drainage favorable</th> <th>Drainage modéré et imparfait</th> <th>Sol humide à nappe permanente ou oscillante</th> <th>Sol très humide à extrêmement humide à nappe permanente</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Z, S, P, L</td> <td style="text-align: center;">40</td> <td style="text-align: center;">40</td> <td style="text-align: center;">20</td> <td style="text-align: center;">≤ 10</td> </tr> <tr> <td>A, E</td> <td style="text-align: center;">40</td> <td style="text-align: center;">20</td> <td style="text-align: center;">≤ 10</td> <td style="text-align: center;">≤ 10</td> </tr> <tr> <td>U</td> <td style="text-align: center;">20</td> <td style="text-align: center;">≤ 10</td> <td style="text-align: center;">≤ 10</td> <td style="text-align: center;">≤ 10</td> </tr> </tbody> </table> <p><i>Remarques:</i> 1°) Dans le sol de plusieurs horizons superposés, la valeur du module à retenir est celle qui correspond à l'horizon le plus défavorable. 2°) Les sols améliorés et les remblais rocheux sont caractérisés par un module de 80 MPa.</p> <p><i>Symboles:</i> Z -- sable S -- sable limoneux P -- limon sableux léger L -- limon sableux A -- limon E -- argile U -- argile lourde</p> <p style="text-align: center;">Fig. 7. Granulométrie des sols (graphique triangulaire) DRA 13954</p>	Sol (Symbole de base cf. figure 1)	Drainabilité du sol				Sol sec à très sec drainage favorable	Drainage modéré et imparfait	Sol humide à nappe permanente ou oscillante	Sol très humide à extrêmement humide à nappe permanente	Z, S, P, L	40	40	20	≤ 10	A, E	40	20	≤ 10	≤ 10	U	20	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Sol (Symbole de base cf. figure 1)	Drainabilité du sol																									
	Sol sec à très sec drainage favorable	Drainage modéré et imparfait	Sol humide à nappe permanente ou oscillante	Sol très humide à extrêmement humide à nappe permanente																						
Z, S, P, L	40	40	20	≤ 10																						
A, E	40	20	≤ 10	≤ 10																						
U	20	≤ 10	≤ 10	≤ 10																						

Tableau 25 - Estimation du CBR selon du type du sol

Dans certaines méthodes la couche de forme peut être surclassée en fonction du matériau d'apport.

La méthode d'Afrique du Sud définit l'épaisseur minimale de la couche de forme pour garantir l'homogénéité de la couche.

- ▶ Classes S1 et S2 = 25 cm ;
- ▶ Classe S3 = 35 cm ;
- ▶ Classe S4 = 45 cm ;
- ▶ Classe S5 = 55 cm ;
- ▶ Classe S6 = 65 cm.

La méthode de Tanzanie spécifie les épaisseurs suivantes : l'épaisseur et la nature de la couche de forme (dite 'foundation' dans le guide) dépendent de la classe de portance, l'objectif étant d'atteindre un CBR > 15% (G15) :

		Subgrade classes						
		S15	S7		S3		S15	
			General requirement	Heavy traffic classes (-H)	General requirements			Heavy traffic classes (-H)
				Moderate or dry	Wet climate	Moderate or dry	Wet climate	
Improved subgrade layer to be constructed	Upper layer (*)	none	150mm G15	300mm G15	150mm G15	150mm G15	300mm G15	300mm G15
	Lower layer (*)	none	none	none	150mm G7	300mm G7	150mm G7	300mm G7

*) Material requirements for Improved subgrade layers, including limits for maximum compacted layer thickness are given in Table 5.5.

Figure 5.4 Design of improved subgrade layers

Figure 31 – Surclassement de la couche de forme selon la méthode de Tanzanie

La figure 1 de la norme espagnole donne les différentes épaisseurs minimales pour obtenir la classe de la plate-forme visée, selon le type du sol sur place et la qualité des matériaux granulaires disponibles.

CATEGORÍA DE EXPLANADA		TIPOS DE SUELOS DE LA EXPLANACIÓN (DESMONTES) O DE LA OBRA DE TIERRA SUBYACENTE (TERRAPLENES, PEDRAPLENES O RELLENOS TODO-UNO)				
		SUELOS INADECUADOS Y MARGINALES (IN)	SUELOS TOLERABLES (0)	SUELOS ADECUADOS (1)	SUELOS SELECCIONADOS (2) y (3)	ROCA (R)
E1 $E_{vd} \geq 60\text{MPa}$	100	IN	1	0	1	
	50	S-EST1	0	2	1	
	30	S-EST1	0	2	1	
E2 $E_{vd} \geq 120\text{MPa}$	100	IN	2	0	2	
	60	S-EST2	0	2	1	
	30	S-EST2	0	2	1	
E3 $E_{vd} \geq 300\text{MPa}$	30	S-EST3	0	2	1	
	50	S-EST3	0	2	1	
	30	S-EST3	0	2	1	

IN Suelo inadecuado o marginal (Art. 330 del PG-3)

0 Suelo tolerable (Art. 330 del PG-3)

1 Suelo adecuado (Art. 330 del PG-3)

2 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)

3 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)

S-EST 1 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

S-EST 2 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

S-EST 3 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

HM-20 Hormigón (Art. 610 del PG-3)

tipo de material

espesor mínimo en cm

suelo de explanación o de la obra de tierra subyacente

Figure 32 - Évolution du CBR d'un sol en fonction des résultats du DCP (mm/blow)

Par exemple si la portance visée est E2 ($EV2 \geq 120$ MPa) et le sol support est de catégorie 1 (sol adéquate) on peut mettre en œuvre les matériaux granulaires suivants :

- ▶ 55 cm de matériaux granulaire type 2 avec $CBR \geq 12$;
- ▶ 25 cm de sol traitée sur place ou
- ▶ 35 cm de matériaux type 3 avec $CBR \geq 20$.

3.7 Matériaux

Les caractéristiques des différents matériaux qui constituent la chaussée et qui sont présentées dans les référentiels seront décrites ci-après.

GNT et Matériaux bitumineux

Les caractéristiques des matériaux granulaires et bitumineux prises en compte dans les différentes méthodes sont résumées dans le tableau suivant :

N°	Méthode	Module de GNT																																																																	
[1]	Road Note 31	<p>TABLE 6.1</p> <p>Properties of unbound materials</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Code</th> <th>Description</th> <th>Summary of specification</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GB1,A</td> <td>Fresh, crushed rock</td> <td>Dense graded, unweathered crushed stone, non-plastic parent fines</td> </tr> <tr> <td>GB1,B</td> <td>Crushed rock, gravel or boulders</td> <td>Dense grading, PI < 6, soil or parent fines</td> </tr> <tr> <td>GB2,A</td> <td>Dry-bound macadam</td> <td>Aggregate properties as for GB1,B (see text), PI < 6</td> </tr> <tr> <td>GB2,B</td> <td>Water-bound macadam</td> <td>Aggregate properties as for GB1,B (see text), PI < 6</td> </tr> <tr> <td>GB3</td> <td>Natural coarsely graded granular material including processed and modified gravels</td> <td>Dense grading, PI < 6 CBR after soaking > 80</td> </tr> <tr> <td>GS</td> <td>Natural gravel</td> <td>CBR after soaking > 30</td> </tr> <tr> <td>GC</td> <td>Gravel or gravel-soil</td> <td>Dense graded, CBR after soaking > 15</td> </tr> </tbody> </table> <p>Notes 1. These specifications are sometimes modified according to site conditions, material type and principal use (see text). 2. GB = Granular roadbase, GS = Granular sub-base, GC = Granular capping layer.</p>	Code	Description	Summary of specification	GB1,A	Fresh, crushed rock	Dense graded, unweathered crushed stone, non-plastic parent fines	GB1,B	Crushed rock, gravel or boulders	Dense grading, PI < 6, soil or parent fines	GB2,A	Dry-bound macadam	Aggregate properties as for GB1,B (see text), PI < 6	GB2,B	Water-bound macadam	Aggregate properties as for GB1,B (see text), PI < 6	GB3	Natural coarsely graded granular material including processed and modified gravels	Dense grading, PI < 6 CBR after soaking > 80	GS	Natural gravel	CBR after soaking > 30	GC	Gravel or gravel-soil	Dense graded, CBR after soaking > 15																																									
Code	Description	Summary of specification																																																																	
GB1,A	Fresh, crushed rock	Dense graded, unweathered crushed stone, non-plastic parent fines																																																																	
GB1,B	Crushed rock, gravel or boulders	Dense grading, PI < 6, soil or parent fines																																																																	
GB2,A	Dry-bound macadam	Aggregate properties as for GB1,B (see text), PI < 6																																																																	
GB2,B	Water-bound macadam	Aggregate properties as for GB1,B (see text), PI < 6																																																																	
GB3	Natural coarsely graded granular material including processed and modified gravels	Dense grading, PI < 6 CBR after soaking > 80																																																																	
GS	Natural gravel	CBR after soaking > 30																																																																	
GC	Gravel or gravel-soil	Dense graded, CBR after soaking > 15																																																																	
[2]	CEBTP	<p>E = 5 CBR (matériaux à gros éléments) E = 3 CBR (matériaux à forte fraction fine) E = 300 MPa (GNT) E = 500 MPa (GNT concassée couche de base)</p>																																																																	
[3]	Australienne	<p>E mesuré avec essai triaxial E GNT sous BB faible épaisseur = 250 MPa (fondation), 300, 350 ou 500 MPa (base : selon la qualité de GNT). E GNT sous matériaux traités = 150 à 350 MPa (qualité normale), en fonction de l'épaisseur et le module équivalent des matériaux traités la recouvrant</p> <p>Table 6.4: Suggested vertical modulus of top sublayer of normal standard base material</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Thickness of overlying bound material</th> <th colspan="5">Modulus of overlying⁽¹⁾ bound material (MPa)</th> </tr> <tr> <th>1000</th> <th>2000</th> <th>3000</th> <th>4000</th> <th>5000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40 mm</td> <td>350</td> <td>350</td> <td>350</td> <td>350</td> <td>350</td> </tr> <tr> <td>75 mm</td> <td>350</td> <td>350</td> <td>340</td> <td>320</td> <td>310</td> </tr> <tr> <td>100 mm</td> <td>350</td> <td>310</td> <td>290</td> <td>270</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>125 mm</td> <td>320</td> <td>270</td> <td>240</td> <td>220</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>150 mm</td> <td>280</td> <td>230</td> <td>190</td> <td>160</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>175 mm</td> <td>250</td> <td>190</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>200 mm</td> <td>220</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>225 mm</td> <td>180</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>> = 250 mm</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> </tr> </tbody> </table> <p>¹ Overlying bound material is either asphalt or cemented material or a combination of these materials.</p> <p>E GNT sous matériaux traités = 210 à 500 MPa (qualité haute), en fonction de l'épaisseur et le module équivalent des matériaux traités la recouvrant :</p>	Thickness of overlying bound material	Modulus of overlying ⁽¹⁾ bound material (MPa)					1000	2000	3000	4000	5000	40 mm	350	350	350	350	350	75 mm	350	350	340	320	310	100 mm	350	310	290	270	250	125 mm	320	270	240	220	200	150 mm	280	230	190	160	150	175 mm	250	190	150	150	150	200 mm	220	150	150	150	150	225 mm	180	150	150	150	150	> = 250 mm	150	150	150	150	150
Thickness of overlying bound material	Modulus of overlying ⁽¹⁾ bound material (MPa)																																																																		
	1000	2000	3000	4000	5000																																																														
40 mm	350	350	350	350	350																																																														
75 mm	350	350	340	320	310																																																														
100 mm	350	310	290	270	250																																																														
125 mm	320	270	240	220	200																																																														
150 mm	280	230	190	160	150																																																														
175 mm	250	190	150	150	150																																																														
200 mm	220	150	150	150	150																																																														
225 mm	180	150	150	150	150																																																														
> = 250 mm	150	150	150	150	150																																																														

		Table 6.5: Suggested vertical modulus of top sublayer of high standard base material					
		Thickness of overlying bound material	Modulus of overlying ¹⁾ bound material (MPa)				
			1000	2000	3000	4000	5000
		40 mm	500	500	500	500	500
		75 mm	500	500	480	460	440
		100 mm	500	450	410	390	360
		125 mm	450	390	350	310	280
		150 mm	400	330	280	240	210
		175 mm	360	270	210	210	210
		200 mm	310	210	210	210	210
		225 mm	260	210	210	210	210
		> = 250 mm	210	210	210	210	210

1 Overlying bound material is either asphalt or cemented material or a combination of these materials.

$$E_e = \left[\frac{\sum h_i E_i^{2.333}}{T} \right]^{0.333}$$

where

E_e = equivalent modulus of total thickness of bound material (MPa)
 E_i = modulus of bound layer i (MPa)
 h_i = thickness of bound layer i (mm)
 T = total thickness of overlying bound materials (mm).

Grave améliorée au ciment : E matériaux améliorés (Rc28j < 1 MPa) = 1000 MPa environ

| [4] | Américaine | Pour la couche de base en générale le coefficient a2 prise en compte dans le dimensionnement est égal à 0.14, qui veut dire une valeur de CBR = 100% et un module de 30 000 psi (210 MPa). Pour la couche de fondation en générale le coefficient a3 prise en compte dans le dimensionnement est égal à 0.11, qui veut dire une valeur de CBR = 30% et un module de 20 000 psi (100 MPa). Ces valeurs sont à ajuster en fonction des matériaux disponibles et selon le graphique présentées dans le chapitre 3.3.1. | | | | | |
| [6] | Algérienne | $E = 500$ MPa (GNT_{base}), $E = 2.5 E_{couche\ inf}$ (GNT_{fondation}) **Matériaux non traités (MNT)** **Tableau 15 : Performances mécaniques des matériaux non traités** | Niveau de la couche | Modules des MNT (MPa) | Valeurs de k | ν | |---|--|--------------|-------| | Base*
(15 ≤ h ≤ 20cm) | GNT = 500 | 2,5 | 0,25 | | | TUF 1 = 500 | 2 | 0,25 | | | TUF 2 = 300 | 2 | 0,25 | | | SG 1 = 700 | 2 | 0,25 | | | SG2 = 300 | 2 | 0,25 | | | AG = 300 | 2 | 0,25 | | Fondation (en sous couches de 25 cm) | E_{MNT} (sous couche 1) = k $E_{sol\ support}$
E_{MNT} (sous couche i) = k E_{MNT} (sous couches i -1)
avec E_{MNT} borné à E_{MNT} couche de base | | | | Fondation MNT sous GB et SB (GB/MNT,) | E_{MNT} (sous couche 1) = k $E_{sol\ support}$ (avec k idem ci-dessus)
E_{MNT} (sous couche i) = k E_{MNT} (sous couches i -1)
avec E_{MNT} borné à 350 MPa | | | | | | | | |

[7]	Française	<ul style="list-style-type: none"> ▶ $E = 2, 2.5$ ou $3 \times E_{\text{couche inf}}$ par couche de 25 cm ($GNT_{\text{fondation}}$) ; ▶ $E_{\text{base}} = 200, 400$ ou 600 MPa selon classe 1 à 3 de GNT (E borné à 360 MPa si GNT sous chaussée bitumineuse) ; ▶ Catégorie 2 si GNT en urbain <p style="text-align: center;">Tableau D.2 — Détermination du module de rigidité des couches de GNT pour le dimensionnement.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Nature de la couche</th> <th style="width: 50%;">Module d'Young</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Couche de base de chaussée souple Ou Couche de GNT de chaussée inverse</td> <td>$E_{GNT} = E_{\text{max}}$</td> </tr> <tr> <td>Couche de fondation de chaussée souple Ou Couche de fondation de chaussée bitumineuse</td> <td> - Subdivision de la couche de GNT en sous-couches d'épaisseur 25 cm à partir du bas (la dernière sous-couche pouvant avoir une épaisseur inférieure). - Calcul du module des sous-couches indicées de bas en haut suivant la relation : Pour $i=1$; $E_{GNT}(1) = \text{Min}(k \times E_{\text{plate-forme}}; E_{\text{max}})$ Pour $i>1$; $E_{GNT}(i) = \text{Min}(k \times E_{GNT}(i-1); E_{\text{max}})$ </td> </tr> </tbody> </table> <p>NOTE la dépendance des valeurs de module avec la profondeur et le type de structure rend compte dans une certaine mesure du caractère non-linéaire des GNT et de leur augmentation de rigidité en fonction de la contrainte moyenne exercée (module plus élevé en couche de base qu'en couche de fondation, valeur plus élevée pour une faible couverture bitumineuse).</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ <p style="text-align: center;">Tableau D.1 — Détermination des paramètres k et E_{max} utilisés pour la détermination du module d'Young de la GNT.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Catégorie</th> <th style="width: 25%;">CG1</th> <th style="width: 25%;">CG2</th> <th style="width: 35%;">CG3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="4">Chaussées souples</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>3</td> <td>2,5</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>E_{max} (MPa)</td> <td>600</td> <td>400</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Chaussées bitumineuses avec GNT couche de fondation</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td colspan="3">3</td> </tr> <tr> <td>E_{max} (MPa)</td> <td colspan="3">360</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Chaussées inverses</td> </tr> <tr> <td>E_{max} (MPa)</td> <td>480</td> <td>Non appropriée</td> <td>Non appropriée</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 	Nature de la couche	Module d'Young	Couche de base de chaussée souple Ou Couche de GNT de chaussée inverse	$E_{GNT} = E_{\text{max}}$	Couche de fondation de chaussée souple Ou Couche de fondation de chaussée bitumineuse	- Subdivision de la couche de GNT en sous-couches d'épaisseur 25 cm à partir du bas (la dernière sous-couche pouvant avoir une épaisseur inférieure). - Calcul du module des sous-couches indicées de bas en haut suivant la relation : Pour $i=1$; $E_{GNT}(1) = \text{Min}(k \times E_{\text{plate-forme}}; E_{\text{max}})$ Pour $i>1$; $E_{GNT}(i) = \text{Min}(k \times E_{GNT}(i-1); E_{\text{max}})$	Catégorie	CG1	CG2	CG3	Chaussées souples				k	3	2,5	2	E_{max} (MPa)	600	400	200	Chaussées bitumineuses avec GNT couche de fondation				k	3			E_{max} (MPa)	360			Chaussées inverses				E_{max} (MPa)	480	Non appropriée	Non appropriée
Nature de la couche	Module d'Young																																											
Couche de base de chaussée souple Ou Couche de GNT de chaussée inverse	$E_{GNT} = E_{\text{max}}$																																											
Couche de fondation de chaussée souple Ou Couche de fondation de chaussée bitumineuse	- Subdivision de la couche de GNT en sous-couches d'épaisseur 25 cm à partir du bas (la dernière sous-couche pouvant avoir une épaisseur inférieure). - Calcul du module des sous-couches indicées de bas en haut suivant la relation : Pour $i=1$; $E_{GNT}(1) = \text{Min}(k \times E_{\text{plate-forme}}; E_{\text{max}})$ Pour $i>1$; $E_{GNT}(i) = \text{Min}(k \times E_{GNT}(i-1); E_{\text{max}})$																																											
Catégorie	CG1	CG2	CG3																																									
Chaussées souples																																												
k	3	2,5	2																																									
E_{max} (MPa)	600	400	200																																									
Chaussées bitumineuses avec GNT couche de fondation																																												
k	3																																											
E_{max} (MPa)	360																																											
Chaussées inverses																																												
E_{max} (MPa)	480	Non appropriée	Non appropriée																																									
[21]	Japonaise	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Le module des matériaux n'est pas mesuré, ils sont caractérisés en fonction du CBR modifié pour les matériaux granulaires et résistance à la compression pour les matériaux traités (aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés) : <p style="text-align: center;">Table 2-1 Quality standards on subbase course materials</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 40%;">Construction method</th> <th style="width: 60%;">Standards</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grain base course</td> <td> Modified CBR: 20% or more (modified CBR for crusher-run steel slag: 30% or more) PI: 6 or less (not applied to crusher-run steel slag) Immersion expansion ratio: 1.5% or less (crusher-run steel slag) </td> </tr> <tr> <td>Cement stabilization</td> <td>Uniaxial compressive strength [7 days]: 0.98 MPa</td> </tr> <tr> <td>Line stabilization</td> <td>Uniaxial compressive strength [10 days]: 0.70 MPa</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Table 2-2 Quality desired in stabilization aggregates</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 40%;">Construction method</th> <th style="width: 30%;">Modified CBR (%)</th> <th style="width: 30%;">PI</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cement stabilization</td> <td>10 or more</td> <td>9 or less</td> </tr> <tr> <td>Lime soil stabilization</td> <td>10 or more</td> <td>6 to 18</td> </tr> </tbody> </table>	Construction method	Standards	Grain base course	Modified CBR: 20% or more (modified CBR for crusher-run steel slag: 30% or more) PI: 6 or less (not applied to crusher-run steel slag) Immersion expansion ratio: 1.5% or less (crusher-run steel slag)	Cement stabilization	Uniaxial compressive strength [7 days]: 0.98 MPa	Line stabilization	Uniaxial compressive strength [10 days]: 0.70 MPa	Construction method	Modified CBR (%)	PI	Cement stabilization	10 or more	9 or less	Lime soil stabilization	10 or more	6 to 18																									
Construction method	Standards																																											
Grain base course	Modified CBR: 20% or more (modified CBR for crusher-run steel slag: 30% or more) PI: 6 or less (not applied to crusher-run steel slag) Immersion expansion ratio: 1.5% or less (crusher-run steel slag)																																											
Cement stabilization	Uniaxial compressive strength [7 days]: 0.98 MPa																																											
Line stabilization	Uniaxial compressive strength [10 days]: 0.70 MPa																																											
Construction method	Modified CBR (%)	PI																																										
Cement stabilization	10 or more	9 or less																																										
Lime soil stabilization	10 or more	6 to 18																																										

		Table 2-3 Quality standards on base course materials	
		Construction method	Standards
		Mechanical stabilization	Modified <i>CBR</i> : 80% or more, <i>PI</i> : 4 or less
		Mechanically stabilized steel slag	Mass of unit volume: 1.50 kg/L or more Modified <i>CBR</i> : 80% or more Immersion expansion ratio: 1.5% or less
		Hydraulic-mechanically stabilized steel slag	Mass of unit volume: 1.50 kg/L or more Modified <i>CBR</i> : 80% or more Uniaxial compressive strength [14 days]: 1.2 MPa or more Immersion expansion ratio: 1.5% or less
		Cement stabilization	Uniaxial compressive strength [7 days]: 2.9 MPa or more
		Lime stabilization	Uniaxial compressive strength [10 days]: 0.98 MPa or more
		Bituminous stabilization	Hot mixing Stability: 3.43 kN or more Flow value: 10 to 40 (1/100 cm) Percentage of air voids: 3 to 12%
			Cold mixing Stability: 2.45 kN or more Flow value: 10 to 40 (1/100 cm) Percentage of air voids: 3 to 12%
		Cement and bituminous stabilization	Uniaxial compressive strength: 1.5 to 2.9 MPa Primary displacement magnitude: 5 to 30 (1/100 cm) Residual strength rate: 65% or more

[22]		Belge	<p>Modules d'élasticité des matériaux granulaires E (MPa)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>MATERIAU</th> <th>E (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sable</td> <td>200 - 300</td> </tr> <tr> <td>Laitier granulé</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>Grave</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>Schiste rouge brûlé</td> <td>350</td> </tr> <tr> <td>Empierrement*</td> <td>400 - 600</td> </tr> </tbody> </table> <p>* y compris l'empierrement traité au chlorure de calcium.</p> <p>Modules viscoélastiques des matériaux hydrocarbonés E (MPa) (pour une vitesse de circulation de 60 km/h)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">MATERIAU</th> <th colspan="5">Température °C</th> </tr> <tr> <th>- 20</th> <th>0</th> <th>+ 20</th> <th>+ 40</th> <th>+ 60</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Bétons hydrocarbonés types I et IV (6,5% de bitume 50/60, v = 3,5%)</td> <td>30 000</td> <td>22 000</td> <td>9 000</td> <td>900</td> <td>90</td> </tr> <tr> <td>Béton hydrocarboné type II (8% de bitume 40/50, v = 3,5%)</td> <td>25 000</td> <td>20 000</td> <td>7 000</td> <td>700</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>Enrobé type III (5,5% de bitume 50/60, v = 5,5%)</td> <td>30 000</td> <td>22 000</td> <td>10 000</td> <td>1 300</td> <td>100</td> </tr> </tbody> </table> <p>v = pourcentage de vides résiduels.</p>	MATERIAU	E (MPa)	Sable	200 - 300	Laitier granulé	200	Grave	250	Schiste rouge brûlé	350	Empierrement*	400 - 600	MATERIAU	Température °C					- 20	0	+ 20	+ 40	+ 60	Bétons hydrocarbonés types I et IV (6,5% de bitume 50/60, v = 3,5%)	30 000	22 000	9 000	900	90	Béton hydrocarboné type II (8% de bitume 40/50, v = 3,5%)	25 000	20 000	7 000	700	60	Enrobé type III (5,5% de bitume 50/60, v = 5,5%)	30 000	22 000	10 000	1 300	100
MATERIAU	E (MPa)																																											
Sable	200 - 300																																											
Laitier granulé	200																																											
Grave	250																																											
Schiste rouge brûlé	350																																											
Empierrement*	400 - 600																																											
MATERIAU	Température °C																																											
	- 20	0	+ 20	+ 40	+ 60																																							
Bétons hydrocarbonés types I et IV (6,5% de bitume 50/60, v = 3,5%)	30 000	22 000	9 000	900	90																																							
Béton hydrocarboné type II (8% de bitume 40/50, v = 3,5%)	25 000	20 000	7 000	700	60																																							
Enrobé type III (5,5% de bitume 50/60, v = 5,5%)	30 000	22 000	10 000	1 300	100																																							

4 Méthodes de dimensionnement des chaussées non revêtues

4.1 Généralités

Les routes non revêtues concernent les voies à faible trafic et ou les voies d'usage particulier (par exemple une piste forestière ou de carrière ne nécessitant pas un niveau de service exigeant).

On peut distinguer trois catégories de routes non revêtues.

- ▶ La piste : considérée comme une voie n'ayant fait l'objet d'aucun tracé particulier, elle supporte généralement un trafic assez faible et ne comporte quasiment aucun aménagement.
- ▶ La Route en Terre Sommaire : généralement liée à des activités économiques saisonnières (agricoles ou forestières), elle a subi quelques aménagements sur le plan du tracé. Le trafic y est plus important que sur les pistes, notamment pendant les périodes de récolte.
- ▶ La Route en Terre Moderne : elle présente des caractéristiques de tracé, de profil en long et en travers plus élaborées. Elle est capable de supporter un trafic relativement important et peut être ultérieurement revêtue. Elle est généralement bien aménagée (assainissement, ouvrages).

Les dégradations qui affectent les routes non revêtues sont :

- ▶ La formation de tôle ondulée ;
- ▶ La formation de nids de poule ;
- ▶ La formation d'ornières et d'épaufrures surtout sensibles sur les routes et pistes à une voie de circulation ;
- ▶ La formation de ravines latérales ou longitudinales, l'entraînement des parties fines argileuses par les eaux superficielles depuis la chaussée vers les accotements et les fossés latéraux
- ▶ La perte annuelle de matériaux (notamment en fonction des saisons des pluies).

Une chaussée non-revêtue doit être dimensionnée de manière à résister aux effets du trafic et aux intempéries :

- ▶ Son épaisseur doit rester suffisante pour éviter le poinçonnement de la plateforme ;
- ▶ Elle doit être constituée de matériaux qui possèdent les caractéristiques géotechniques suivantes :
 - Cohésion suffisante pour assurer la liaison des grains en saison sèche afin de diminuer la formation de tôle ondulée et maintenir la portance de la couche ;
 - Ne pas contenir trop de fines, ni être trop plastiques pour éviter la glissance et les ornières en saison pluvieuse ;
- ▶ Son profil en travers a une forme bombée pour ralentir l'apparition des dégradations. Lors des travaux d'entretien, on vise à maintenir ou à rétablir ce profil en travers bombé (reprofilage, rajout de matériaux ...).

4.2 Présentation de méthodes

La conception des routes non revêtues peut être réalisée selon différentes méthodes ; quatre d'entre elles sont résumées ci-après :

- ▶ Méthode de Tanzanie présentée dans le Manuel « Pavement and materials design manual – The United Republic of Tanzania - 1999 » ;
- ▶ Méthode AASHTO décrite dans la partie 2, chapitres 2 et 4 – 1993 et le catalogue présenté dans le chapitre 4.2.1 ;
- ▶ Méthode CEBTP présentée dans le guide Pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux - 1984 ;
- ▶ Méthode VIZIRET (système de gestion de l'entretien des routes non revêtues et pas directement de dimensionnement).

Photo 1 - Piste non revêtue au Sénégal



© Egis – Camille BOURDON

4.2.1 Méthode de Tanzanie

La méthode de dimensionnement des routes non revêtues de Tanzanie est présentée dans le Manuel « Pavement and materials design manual – The United Republic of Tanzania 1999. »

Des structures types sont déterminées selon :

- ▶ La classe de portance de la plate-forme, selon son CBR ;
- ▶ Le trafic attendu AADT (Average Annual Daily Traffic) ;
- ▶ Le climat (sec ou humide) ;
- ▶ La catégorie de la route : route principale ou route secondaire.

Étape 1 : Le choix de la structure commence par la détermination de la portance de la plate-forme. Les matériaux sont classés selon le CBR en trois catégories S15, S7 et S3. Les classes de la plate-forme sont présentées ci-dessous :

Classe de plateforme	CBR %			Densité de détermination du CBR
	Climat humide ou modéré Valeur à 4 jours d'immersion	Climat sec (les deux exigences sont à respecter)		
		Valeur à wOPM	Valeur à 4 jours d'immersion	
S15	≥ 15	≥ 15	≥ 7	95% dsOPM
S7	7 - 14	7 - 14	3 - 14	93% dsOPM
S3	3 - 6	3 - 6	2 - 6	100 % dsOPN

Tableau 26 - Classes de la plate-forme

Si la plate-forme ne présente pas une portance suffisante, la mise en œuvre d'une couche d'assise est prévue. Cette couche granulaire sera constituée de matériaux de CBR > 15 (G15) ou CBR > 7 (G7) en fonction de la portance de la plate-forme ; leurs caractéristiques sont détaillées au Tableau 27.

Essai	G15	G7
CBR [%], climat humide ou modéré	Min 15 après 4 jours d'immersion	Min 7 après 4 jours d'immersion
CBR [%], climat sec (les deux exigences sont à respecter)	Min 15 à wOPM	Min 7 à wOPM
	Min 7 après 4 jours d'immersion	Min 3 après 4 jours d'immersion
gonflement [%] à 100%dsOPM	Max 1.5	Max 2.0
IP [%]	Max 25	Max 30
Taille maxi des particules, Dmax	2/3 de l'épaisseur de couche	2/3 de l'épaisseur de couche
Épaisseur de couche compactée [cm]	Max 25	Max 25

Tableau 27 - Caractéristiques des matériaux de structure, G15 et G7

Étape 2 : les caractéristiques nécessaires de la couche de surface, noté GW (Gravel Wearing) sont présentées ci-après dans le cas d'une route principale.

Caractéristiques des matériaux	Exigences	
	Type de climat	
	Humide	Sec ou tempéré
CBR [%] à 95% dsOPM	Minimum 25 après 4 jours d'immersion	Minimum 25 à wOPM
% de passant à 37.5 mm	Minimum 95	
Retrait SP SP = LS x (% pass. 0.425 mm)	120-400 ¹⁾	
Coefficient classement GC ²⁾	16 - 34	
Densité sèche in situ	Min 95 %dsOPM	
¹⁾ En zones bâties, un maximum de 270 de SP est souhaitable pour réduire les problèmes de poussières. ²⁾ GC = [(% passant 28 mm) - (% passant 0.425 mm)] x (% passant 5 mm / 100)		

Figure 33 - Caractéristiques de la couche de surface, GW, routes principales

Pour les routes secondaires, les valeurs de CBR peuvent être baissées de 15% par rapport aux valeurs données à la figure ci-dessus, correspondant aux routes principales.

Étape 3: En fonction de la classe de la plate-forme et du trafic attendu, la structure peut être choisie selon les tableaux suivants en fonction du type de la route (route principale ou secondaire).

Classe plate-forme	TMJA (véhicule/jour)					
	< 20		20 - 100		100 - 300	
S15						
S7						
S3	climat sec/modéré	climat humide	climat sec/modéré	climat humide	climat sec/modéré	climat humide

Tableau 28 - Structures de routes principales

	Classes de plate-forme		
	S15 ou S7	S3	
		climat sec ou modéré	climat humide
surface			
assise	aucune		

Tableau 29 - Structures de routes secondaires

Étape 4 : Détermination de l'usure annuelle : la couche de surface nécessite un rechargement périodique pendant la durée de vie de la chaussée. La fréquence de rechargement dépend de la perte annuelle de matériaux granulaires. Cette valeur varie entre 1 et 3 cm pour une route avec une TMJA égal à 100 véhicules/jour.

4.2.2 Méthode AASHTO

La méthode AASHTO est une méthode reposant sur des abaques qui permet de concevoir une route prenant en compte des plages de valeurs de modules de matériaux ou de sol et de trafic assez larges. Il est également possible d'avoir recours à une couche inférieure de CBR plus faible que celui de la couche de surface.

La méthode décrite dans la partie 2, chapitre 4 du Guide AASHTO est conçue pour le dimensionnement des routes départementales et routes forestières, non revêtues, aux USA, pour lesquelles le trafic cumulé varie entre 10 000 et 100 000 PL (exprimé en essieux équivalent de 8,2 t).

Le dimensionnement est obtenu au moyen des abaques permettant de déterminer l'épaisseur de la couche granulaire, augmentée avec une épaisseur correspondant à la perte de matériaux granulaires, estimée pendant la durée de vie de la chaussée.

Les paramètres nécessaires pour réaliser le dimensionnement sont les suivants :

- ▶ Trafic, exprimé en nombre cumulé de passages d'un essieu équivalent de 8,2 t ou 18 kip ; le trafic doit être déterminé pour la saison sèche et la saison humide ;
- ▶ Module élastique du sol de plate-forme MR ;
- ▶ Module élastique des couches granulaires ;
- ▶ E_{BS} – module de la couche de base (en psi) ;
- ▶ E_{SB} – module de la couche de fondation (en psi) ;
- ▶ Épaisseur de la couche de base D_{BS} (en inches) ;
- ▶ Perte de niveau du service Δ PSI, admise entre la mise en service et la fin de la durée de vie de la chaussée. Le PSI (Present Serviceability Index) caractérise l'état de déformation de la chaussée, il est compris entre 5 et 0.
- ▶ Orniérage admissible de la couche de surface, RD (en inches),
- ▶ Perte de matériaux granulaire, GL (en inches).

Le dimensionnement est effectué avec l'utilisation de quatre abaques, dans l'ordre.

Étape 1 : Détermination du trafic admissible saisonnier, basée sur la valeur du Δ PSI (Figure 34).

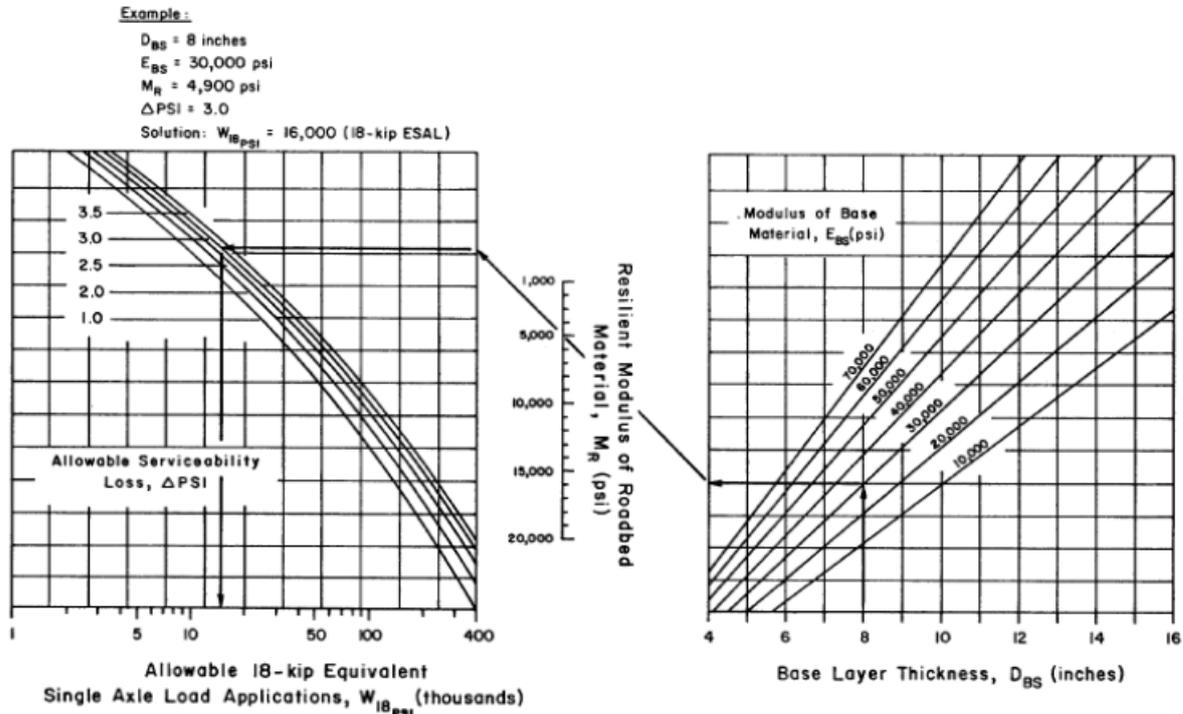


Figure 4.2. Design Chart for Aggregate-Surfaced Roads Considering Allowable Serviceability Loss

Figure 34 - Abaque d'AASHTO basé sur la perte de niveau de service

L'exemple présenté ci-dessous montre une structure avec une couche de base d'une épaisseur de 8 inches (environ 20cm) avec un module de 30.000 psi (environ 200 MPa) sur un sol avec un module élastique de 4.900 psi (environ 34 MPa).

Pour une perte de niveau du service $\Delta \text{PSI} = 3$, le trafic admissible est égal à 16.000 essieux de 8.2 tonnes.

Étape 2 : L' étape suivante du dimensionnement est la détermination du trafic admissible saisonnier, basée sur l'orniérage admissible (Figure 35).

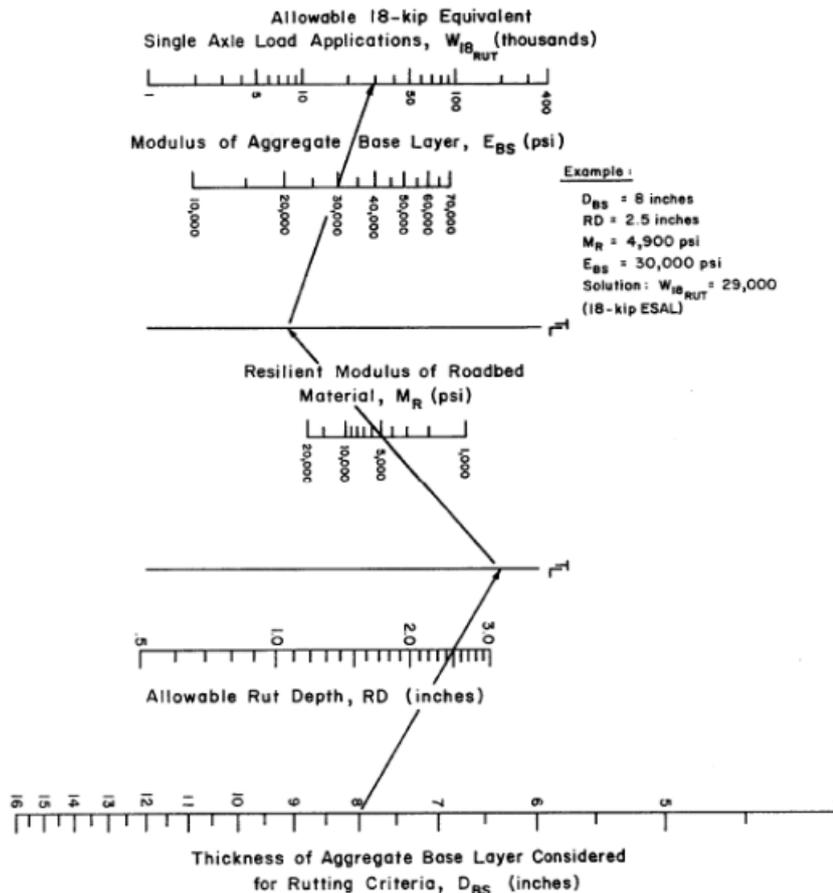


Figure 4.3. Design Chart for Aggregate-Surfaced Roads Considering Allowable Rutting

Figure 35 - Abaque AASHTO, basé sur l'orniérage admissible

Pour la structure retenue ci-dessus, pour un orniérage admissible de 2.5 inches (environ 6 cm), le trafic admissible est égale à 29.000 essieux de 8.2 tonnes.

Cette démarche doit être répétée pour les quatre saisons avec les modules du sol correspondants. Une fois les trafics admissibles par saison déterminés, selon les deux paramètres (ΔPSI , orniérage), il est possible de calculer le dommage saisonnier en divisant le trafic admissible par le trafic attendu par saison.

La somme des dommages saisonniers donne le dommage total. L'épaisseur de la couche de base est acceptable, si les deux dommages (dommage selon le ΔPSI et selon l'orniérage) sont inférieurs à 1.

Étape 3 : En utilisant les résultats de calcul de dommage, la Figure 36 peut être tracée ; l'épaisseur optimale est obtenue par itération avec différentes épaisseurs de couche de base.

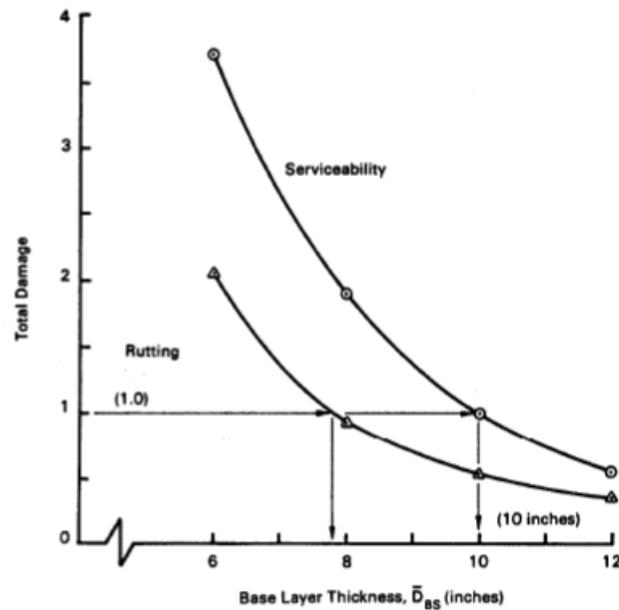


Figure 4.4. Example Growth of Total Damage Versus Base Layer Thickness for Both Serviceability and Rutting Criteria

Figure 36 – AASHTO - Dommages pour différentes épaisseurs de couche de base

L'exemple ci-dessus montre que dans ce cas pour un dommage maximal de 1, une couche de base d'une épaisseur de 10 inches (environ 24.5 cm) est nécessaire selon le critère de perte de niveau du service.

L'épaisseur nécessaire de la couche de base (D_{BS}) sera calculée en fonction de l'épaisseur optimale de la couche de base obtenu ci-avant et la perte de matériaux granulaire (GL) suivant la formule suivante :

$$D_{BS} = \bar{D}_{BS} + (0.5 \times GL)$$

Plusieurs formules sont proposées dans le guide AASHTO pour déterminer la valeur de la perte de matériaux granulaire.

Étape 4 : Transfert d'une certaine épaisseur de la couche de base en couche de fondation (Figure 8). L'épaisseur de la couche de fondation est déterminée en transférant une certaine épaisseur de la couche de base en couche de fondation, selon la démarche suivante :

- ▶ Choisir l'épaisseur finale de la couche de base ($D_{BS f}$),
- ▶ Tracer une droite jusqu'au module estimé de la couche de fondation (E_{SB}),
- ▶ Traverser avec la droite l'échelle correspondant à la diminution de l'épaisseur de la couche de base ($D_{BS i} - D_{BS f}$),
- ▶ L'épaisseur nécessaire de la couche de fondation (DSB) est donnée (en inches) en fonction du module estimé de la couche de base E_{SB} (en inches).

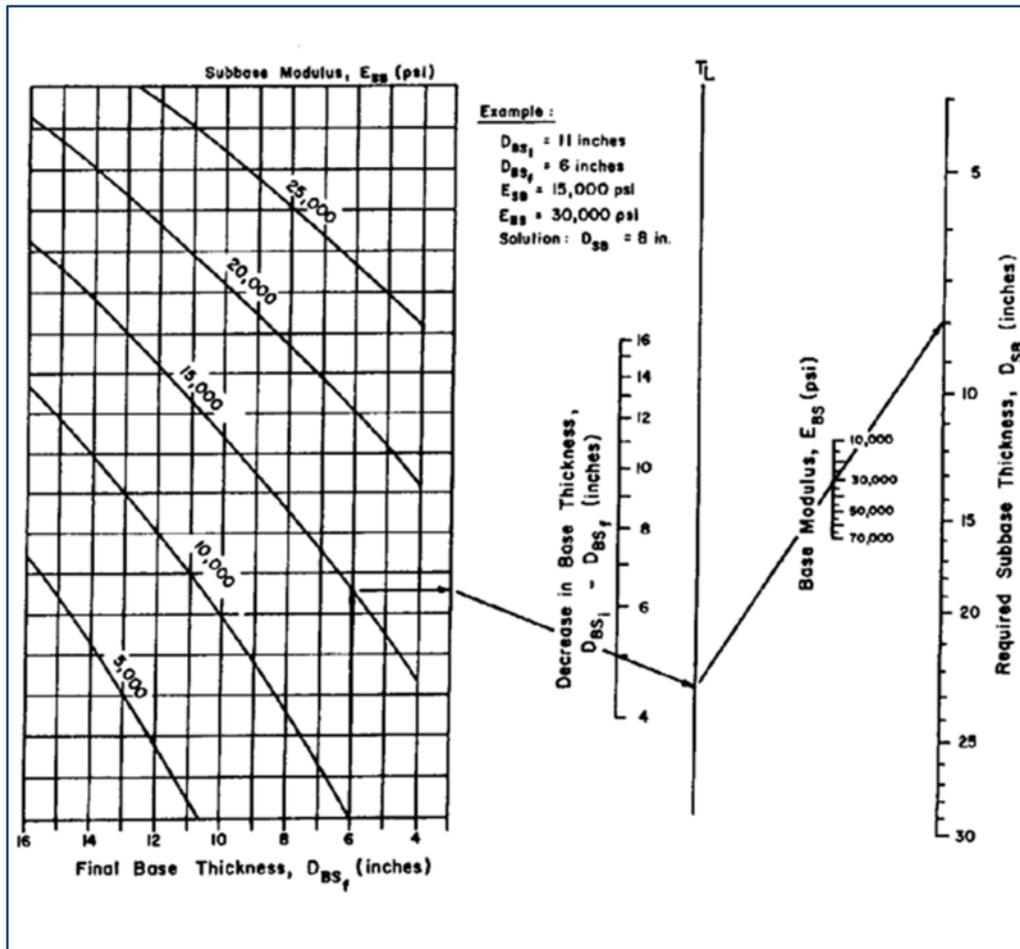


Figure 37 – AASHTO – Équivalence couche de base et fondation

4.2.3 Catalogue AASHTO

Le guide AASHTO propose également une fiche catalogue qui donne l'épaisseur de la couche de base nécessaire (4 à 17 pouces) en fonction des paramètres suivants :

- ▶ 3 classes de trafic (exprimé en essieux équivalent de 8,2 tonnes) :
 - Trafic intense : 60 000 – 100 000,
 - Trafic moyen : 30 000 – 60 000,
 - Trafic faible : 10 000 – 30 000,
- ▶ 5 classes de qualité du sol support :
 - Très bon,
 - Bon moyen,
 - Faible
 - Très faible.
- ▶ Zone climatique :
 - I – zone humide, sans période de gel,
 - II – zone humide, cycles de gel – dégel,
 - III – zone humide, longue période de gel suivi d'une période de dégel en de printemps,
 - IV – zone sèche, sans période de gel,
 - V – zone sèche, cycles de gel – dégel,

- VI – zone sèche, longue période de gel suivi d'une période de dégel au printemps.

Table 4.10. Aggregate Surfaced Road Design Catalog: Recommended Aggregate Base Thickness (in Inches) for the Six U.S. Climatic Regions, Five Relative Qualities of Roadbed Soil and Three Levels of Traffic

Relative Quality of Roadbed Soil	Traffic Level	U.S. Climatic Region					
		I	II	III	IV	V	VI
Very good	High	8*	10	15	7	9	15
	Medium	6	8	11	5	7	11
	Low	4	4	6	4	4	6
Good	High	11	12	17	10	11	17
	Medium	8	9	12	7	9	12
	Low	4	5	7	4	5	7
Fair	High	13	14	17	12	13	17
	Medium	11	11	12	10	10	12
	Low	6	6	7	5	5	7
Poor	High	**	**	**	**	**	**
	Medium	**	**	**	15	15	**
	Low	9	10	9	8	8	9
Very poor	High	**	**	**	**	**	**
	Medium	**	**	**	**	**	**
	Low	11	11	10	8	8	9

*Thickness of aggregate base required (in inches).

**Higher type pavement design recommended.

4.2.4 Méthode CEBTP

Cette méthode est présentée dans le guide « CEBTP- Guide Pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux - neuf 1984 ».

Il s'agit de calculer l'épaisseur minimale de matériaux nécessaire pour éviter le poinçonnement du sol de la plate-forme en tenant en compte de la fréquence de rechargement, puis de déterminer la surépaisseur utile pour pallier l'usure des matériaux sous le trafic.

Étape 1 : Détermination de la valeur du CBR corrigée :

Une plastification du sol supérieure à celle retenue pour la détermination du CBR standard est admise : pour le dimensionnement des routes en terre, un CBR corrigé supérieur à celui habituellement retenu est pris en compte (Figure 38).

Le CBR corrigé est déterminé en prenant en compte dans l'essai, non pas la pression correspondant à un enfoncement de 2.5 mm du poinçon, mais la moitié de la pression de rupture au poinçonnement.

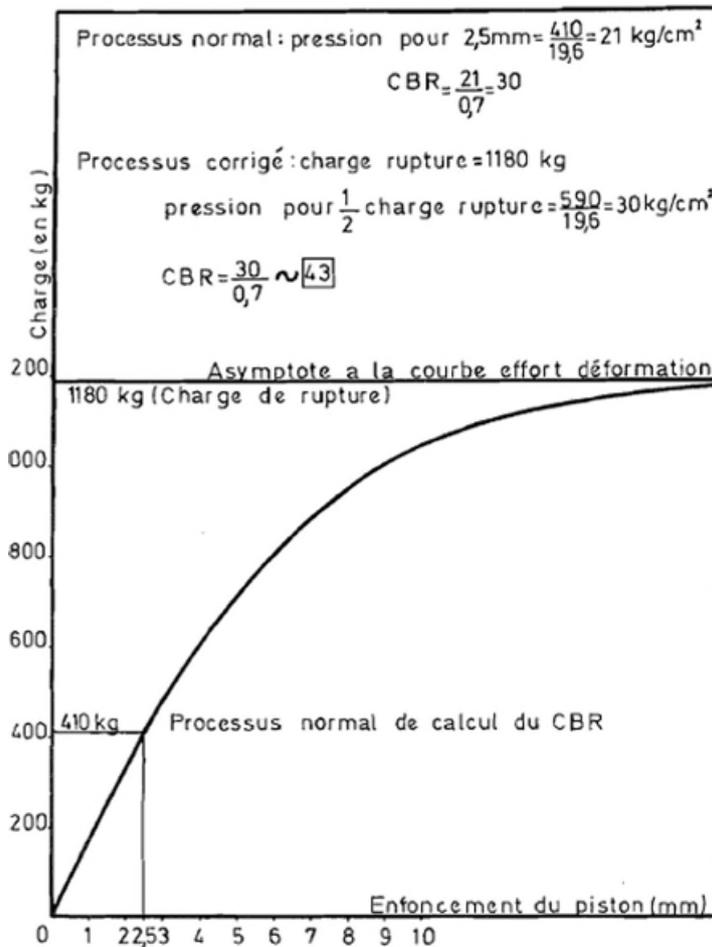


Figure 38 - Exemple de calcul de CBR pour une route en terre [2]

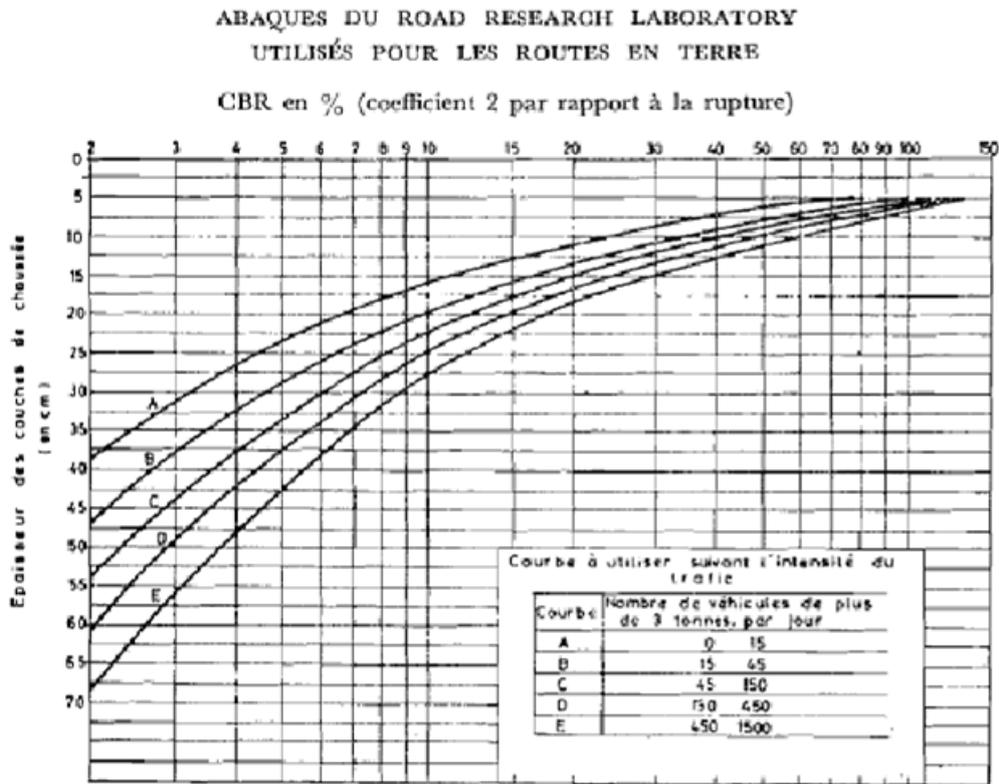
Étape 2 : L'épaisseur minimale de chaussée, fonction du CBR corrigé du sol et du trafic prévu, est déterminée avec la formule de PELTIER :

$$e = \frac{100 + \left(75 + 50 \log \frac{N}{10}\right) \sqrt{P}}{\text{CBR} + 5}$$

Avec :

- ▶ e = épaisseur en cm,
- ▶ N = nombre de poids lourds de plus de 3 tonnes par jour,
- ▶ P = poids de la roue maximale en tonnes (ou de deux roues jumelées).
- ▶ CBR = Valeur de CBR corrigé selon la méthode décrite ci-avant.

Les **abaques de Road Research Laboratory** (Figure 39) peuvent également être utilisés.



Dimensionnement des chaussées en terre

Figure 39 - Abaques de Road Research Laboratory [2]

Étape 3 : Détermination de l'usure sous le trafic. On peut admettre en général les usures suivantes :

- ▶ 1 cm/an pour une intensité du trafic de 10 à 30 véhicules/jour ;
- ▶ 2 cm/an pour une intensité du trafic de 30 à 100 véhicules/jour ;
- ▶ 3 cm/an pour une intensité du trafic de 100 à 300 véhicules/jour.

La perte de matériaux peut également calculée par la formule :

$$GLA = [T2 / (T2 + 50)] * f * (4,2 + 0,092T + 3,5 R2 + 1,88 VC)$$

- ▶ GLA = perte annuelle moyenne de gravier (en mm),
- ▶ T = trafic annuel dans les deux sens, en milliers de véhicules,
- ▶ R = pluviométrie annuelle (en m),
- ▶ VC = pente longitudinale de la chaussées (en m/km)
- ▶ f = coefficient en fonction des matériaux de chaussées (mm) :
 - = 0,94 pour graveleux latéritique,
 - = 1.1 pour gravier quartzique,
 - = 0.7 pour gravier volcanique,
 - = 1.5 pour gravier corallien.

Cette formule est assez complète car elle prend en compte à la fois le trafic, la pluviométrie et la topographie de la route.

Qualité des matériaux

Le **CBR minimal** des matériaux est fonction du trafic :

- ▶ Si le trafic est supérieur à 30 véhicules/jour – CBR corrigé ≥ 30 ;
- ▶ Si le trafic est inférieur à 30 véhicules/jour – CBR corrigé ≥ 20 .

Si la route doit être ultérieurement revêtue, un CBR (non corrigé) au moins égal à 30 est exigé.

Les **caractéristiques de plasticité** dépendent du climat :

- ▶ Chaud et humide : $LL \leq 35$, IP entre 10 et 15 ;
- ▶ Tropical à saison sèche : $LL \leq 40$, IP entre 15 et 25 ;
- ▶ Aride : $LL \leq 55$, IP entre 10 et 30.

Les **fuseaux granulométriques** du matériau de route en terre à respecter sont [2] :

Diamètre	Pourcentage passant		
	1	2 (recommandé)	3
40 mm			100
20 mm	100	100	85-100
10 mm	70-100	65-100	35-100
5 mm	50-90	45-85	40-95
2 mm	30-60	30-68	23-77
1 mm	25-50	25-55	18-62
0.5 mm	20-40	20-48	15-54
0.2 mm	13-35	15-37	12-43
80 μ	10-30	12-32	10-38

4.2.5 Méthode VIZIRET

Viziret est un système de gestion de l'entretien d'un réseau de routes non revêtues, mis au point par le LCPC en 1998. Il permet la quantification et la qualification des dégradations d'une route non revêtue et propose :

- ▶ Une liste de travaux type d'entretien,
- ▶ Une classification des dégradations avec une grille de quantification de la gravité de chacune d'elles en relation avec la liste des travaux types,
- ▶ Un indice de viabilité défini par la prise en compte de l'ensemble des dégradations structurelles.

Le lecteur pourra se référer à cette méthode pour définir les travaux d'entretien d'une route non revêtue.

La perte de matériaux sous trafic y est définie dans le Tableau 30

Trafic (véhicule/jour)		Site neutre
0-50		15 mm
50-100		20 mm
100-200		25 mm
200-400		30 mm
>400		35 mm
Correction	Pluie isohyète (mm)	Site
0	< 1250	Neutre
+ 10 %	1250-1500	Vallonné
+ 20 %	1500-2500	Accidenté
+ 30%	>2500	Très accidenté

Tableau 30 -Perte annuelle de matériaux en fonction du trafic, du site et de la pluviométrie

4.2.6 Conclusions des méthodes routes non revêtues

La méthode Tanzanie est une méthode simple limitée à un trafic de 300 véhicules/jour, qui permet le recours à des matériaux de CBR plus faible dans les couches inférieures éventuelles.

La méthode AASHTO est une méthode reposant sur des abaques qui permet de concevoir une route en prenant en compte des plages de valeurs de modules de matériaux/sol et de trafic assez larges. Il est également possible d'avoir recours à une couche inférieure de CBR plus faible que celui de la couche de surface.

Les méthodes AASHTO et VIZIRET sont les plus complètes dans la définition de la perte annuelle de matériaux car elles prennent en compte à la fois le trafic, la pluviométrie et la topographie de la route.

Ces méthodes ont des limites d'emploi différentes, notamment par rapport au trafic et aux matériaux, ce qui peut justifier l'emploi de l'une ou l'autre méthode.

L'utilisation d'une structures pré-calculées d'un catalogue, présentées dans ce chapitre (catalogue de Tanzanie ou le catalogue AASHTO) a pour objectif d'éviter au concepteur d'une part, une connaissance approfondie de l'ensemble des règles de dimensionnement, et d'autre part, la réalisation de calculs numériques plus ou moins fastidieux, facilitant ainsi la comparaison entre les différentes solutions possibles pour un projet donné. Cependant il est important de savoir, que ces méthodes sont basées sur un trafic exprimé en essieux de référence de 8.2t ou 18 kip. Pour les chaussées non revêtues le mécanisme de dégradation n'étant ni de la fatigue, ni uniquement de la plastification, le trafic équivalent en essieux de 130 kN (référentiel français) ne pourra pas à priori être simplement un multiple de $(8.2/13)^5$.

5 Synthèse des hypothèses et données d'entrée des méthodes

Afin de faire une synthèse des nombreuses hypothèses et données d'entrée prises en compte dans les différentes méthodes présentées ci-avant, deux tableaux de synthèse ont été bâtis pour rassembler les principales informations, l'un pour les guides/manuels et un autre pour les catalogues.

Paramètre	Guide/Manuel							
	Américaine (AASHTO 1993)	Anglaise (DMRB 2006)	Belge (CRR - R 49/83)	Canadienne (AASHTO 1993)	Australienne (AUSTRROADS Part 2 - 2012)	Brésilienne (Manual de Pavimentação DNIT 2006)	Japonaise (Handbook of Asphalt Pavement 2019)	CEBTP (1984)
Type de méthode	Empirique	Empirique	Analytique	Empirique	Analytique	Empirique	Empirique	
Essieu/charge de référence	8,16t	8,16t	13t	8,16t	8,16t	8,16t	Essieu de référence 10t (mais pour la classe de trafic la charge de référence est 5t)	13t
Portance du sol/CBR (critère)	Calcul module par CBRsol support	Calcul module par CBRsol support	Calcul module par CBRsol support/type de sol et conditions de drainage	Calcul module par CBRsol support	Calcul module par CBRsol support	CBRsol support	Calcul module par CBRsol support	Calcul module par CBRsol support (95%OPM)
Classes	MR (psi) = 750 à 3000 x CBR ; MR (psi) = 1500 x CBR si CBR < 10%, soit MR (MPa) = 10.3 x CBR ; MR (psi) = 2555 x CBR ^{0.64} si matériaux fins soit MR (MPa) = 17.6 x CBR ^{0.64} MR (psi) = 3000 x CBR ^{0.65} soit MR (MPa) = 20.7 x CBR ^{0.65} [AASHTO 2002].	Classe 1 - E = 50 MPa Classe 2 - E = 100 MPa Classe 3 - E = 200 MPa Classe 4 - E = 400 MPa	E = 10 x CBR Le module du sol est déterminé à partir du type de sol et de ses conditions de drainabilité. Il n'y a pas de classes de plateforme bien définies, même si des tranches de EV2 sont définies (10 MPa, 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa, 60 MPa et 80 MPa)	MR (MPa) = 17.6 x CBR ^{0.64} / Prise en compte des effets saisonniers	E = 10 x CBR, avec max = 150 MPa (attention particulière à la densité et w d'essai)	Droites de CBR du sol dans l'abaque Nxépaisseur total : 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 12, 15 et 20	Il n'y a pas des classes mais des fourchettes de valeurs de CBR (la limite basse de la fourchette est retenue) : 2 à 3 3 à 4 4 à 6 6 à 8 8 à 12 12 à 20 >20	S1 - E = 25 MPa S2 - E = 50 MPa S3 - E = 75 MPa S4 - E = 150 MPa S5 - E = 300 MPa Si CBR < 5, on substitue sur 50 cm dans la mesure du possible
Couche de GNTassise								
Epaisseur	150 cm (une seule couche)	de 15 à 60 cm	Mini 15 cm	MG112 = 50mm - 100mm et + MG20 = 50mm - 200mm et +	Mini 10 cm	10 à 20 cm	Mini 7cm et maxi 3xD	Mini 15 cm
Exigence mécanique	Couche de base - en général le coefficient a2 pris en compte dans le dimensionnement est égal à 0.14, une valeur de CBR = 100% et un module de 30 000 psi (210 MPa). Couche de fondation en général le coefficient a3 pris en compte dans le dimensionnement est égal à 0.11, une valeur de CBR = 30% et un module de 20 000 psi (100 MPa). Ces valeurs sont à ajuster en fonction des matériaux disponibles et selon le graphique présentées dans le chapitre 3.3.1.	Fonction de la classe de la plateforme	Ebase = 400 à 600 Mpa Efondation = 200 à 300 Mpa	E _{MG112} = 90 à 110 MPa E _{MG20} = 125 à 290 MPa	E mesuré avec essai triaxial: E GNT sous BB faible épaisseur = 250 MPa (fondation), 300, 350 ou 500 MPa (base : selon la qualité de GNT). E GNT sous matériaux traités = 150 à 350 MPa (qualité normale), en fonction de l'épaisseur et module équivalent des matériaux traités la recouvrant	Couche de base granulaire - CBRmini = 60% Couche de fondation - CBRmini = 20%	Couche de base granulaire - CBRmodifié mini = 80% Couche de fondation (sub-base)- CBR modifié mini = 20% , 30%	E = 5 CBR (matériaux à gros éléments) E = 3 CBR (matériaux à forte fraction fine) E = 300 MPa (GNT) E = 500 MPa (GNT concassée couche de base)
Caractéristiques granulométriques	0/37,5, 0/25, 0/19	0/45, 0/63, 0/80	0/16; 0/32; 0/40	MG20 0/20 MG112 0/112	0/20; 0/40	GNT base - % pass 0,075mm < 2/3 pass 0,425mm / LA ≤ 50	M (crushed stone) 40; M30; M25; C (Crusher-run) 20; C30; C40	0/40; 0/31,5
Risque de calcul	Fonction du réseau (R%, S0, et Delta PSI)	Non pris en compte	La valeur n'est pas renseigné mais la notion de risque de calcul est introduite dans la méthode	fonction du réseau	fonction du réseau (trafic) de la proportion de chaussée non dégradée acceptable à la fin de la durée de vie	Non renseigné	fonction du réseau	Pris en compte mais la valeur n'a pas été renseignée

Critères supplémentaires (drainage/périodicité des entretiens)	Prise en compte de coefficients de drainage/zone climatique	Non renseigné	Le climat de référence pris en compte dans la méthode est un climat modéré et humide (50% de l'année)	Prise en compte de coefficients de drainage (+ importants que ceux d'AASHTO à cause des hivers rigoureux)	Récommandations pour des dispositions constructives et matériaux. Les principes d'entretien sont présentés périodicité n'est pas cité mais les	Prise en compte de coefficients de drainage/zone climatique	Non pris en compte - les dispositifs de drainage sont supposés garantir le drainage de la chaussée	Pris en compte par PI fonction du climat (chaude et humide, sec et aride)
Température de référence	20°C	20°C	3 zones de température (froide, modéré et chaude) : moyenne 1,6°C, 12°C et 25°C Enrobés (module à -20°C; 0°C; +20°C; +40°C +60°C) Prise en compte gel/dégel	20,5°C au Nord et 17,5°C au Sud	20 à 27°C (fonction des villes de référence)	Caractérisation des matériaux stabilité Marshall	Caractérisation des matériaux stabilité Marshall	Caractérisation des matériaux stabilité Marshall
Durée de dimensionnement (années)	20	20	20	25 à 30	20	10	10 (mais possibilité de prise en compte d'une durée différente)	15

Tableau 31 - Synthèse hypothèses de dimensionnement - Méthodes

Paramètre	Catalogue					
	Road Note 31 (1993)	Afrique du Sud (Catalogue SATCC 2001)	Algérie (Catalogue 2000)	Espagnol (Catalogue Norma 6,1IC Seccionnes de formes)	Sénégal	Allemagne (Catalogue RstO 12 2015)
Essieu/charge de référence	8,16t	8,16t	13t	13t	13t	10t
Portance du sol/CBR (critère)	Calcul module par CBRsol support (95%OPM)	Calcul module par CBRsol support	Portance de la plateforme et CBR (95%OPM)	Calcul module par CBRsol support	Portance de la plateforme et CBR	Portance de la plateforme
Classes	S1 = 2% 3% ≤ S2 ≤ 4% 5% ≤ S3 ≤ 7% 8% ≤ S4 ≤ 14% 15% < S5 ≤ 29% S6 = 30%.	S1 = 2% 3% ≤ S2 ≤ 4% 5% ≤ S3 ≤ 7% 8% ≤ S4 ≤ 14% 15% < S5 ≤ 29% S6 = 30%.	E = 5x CBR S4 - E = 14 MPa S3 - E = 25 MPa S2 - E = 50 MPa S1 - E = 125 Mpa S0 - E = 200 MPa	S1 < 5% S2 < 10% S3 < 25% S4 < 40% S5 > 40%	E1 - EV2>60MPa / d ≤ 250MPa E2 - EV2>120MPa / d ≤ 200 MPa E3 - EV2>300MPa / d ≤ 150 MPa	E = 5 x CBR PF1 - Emin 20 MPa / EV2>30MPa / d ≤ 300MPa / CBR mini 5% PF2 - Emin 50 MPa /EV2>80MPa / d ≤ 200 MPa (80 MPa traitée) / CBR mini 10% PF2qs - Emin 80 MPa /EV2>100MPa / d ≤ 120 Mpa (70 MPa traitée) / CBR mini 15% PF3 - Emin 120 MPa /EV2>120MPa / d ≤ 90 MPa (60 MPa traitée)/ CBR mini 25% PF4 - Emin MPa /EV2>200MPa / d ≤ 50 MPa traitée MPa / CBR mini 40%
Couche de GNTassise						
Epaisseur	Mini 15 cm	Mini 15 cm	Mini 15 cm	20 à 30 cm	GNT 0/14 = 10 cm GNT 0/20 = 15 cm GNT 0/31,5 = 20 cm	Fonction du module de 15 à 35 cm
Exigence mécanique	Caractérisation par le PI et le CBR PI < 6 et CBR > 30	CBR > 30 - fondation CBR > 80 - base	E = 500 MPa (GNTbase), E= 2.5 x Ecouche inf (GNTfondation)	Non mentionnée dans la catalogue	E = 500 MPa (GNTbase), E= 3 x Ecouche inf (GNTfondation) par couche de 25 cm maximum, plafonné à 600 MPa en structure GNT/ GNT, 360 MPa en structure GNT/GB	80 à 180 Mpa
Caractéristiques granulométriques	0/37,5 0/28 0/20	0/50 0/37,5	0/20 0/31 ,5	Non mentionnée dans la catalogue	GNT 0/14 GNT 0/20 GNT 0/31,5	0/45
Risque de calcul	Non mentionné dans le catalogue	Non mentionné dans le catalogue	Non mentionné dans le catalogue	Non mentionné dans le catalogue	5% et 25 %	Non mentionné dans le catalogue
Critères supplémentaires (drainage/périodicité des entretiens)	Prise en compte du niveau de la nappe fréatique en fonction des saisons (pluviométrie)	coefficient selon la zone climatique	Premier entretien 8 à 10 ans	Le catalogue propose la prise en compte de 3 zones climatiques en fonction de la pluviométrie mais seulement pour les enrobés drainants	La périodicité n'est pas triatée dans le catalogue mais un plan triennal est recommandé pour confronter des paramètres économiques et les auscultations sur les réseaux routiers Sénégalais	coefficient selon la zone climatique (majoration ou minoration de l'épaisseur total)
Température de référence	30°C	Non mentionné mais les fiches de structures sont divisée en région sèche et région humide	Non mentionnée mais 4 zones climatiques sont définies dans la catalogue	Non mentionnée mais 3 zones climatiques sont définies dans la catalogue	34°C	non mentionné mais prise en compte de la zone climatique pour la définition de l'épaisseur total de la chaussée
Durée de dimensionnement (années)	10 à 20 ans	10 à 20 ans (fonction du réseau et du risque - mais sans mentionné une valeur que deux classes : niveau bas et niveau haut)	20 à 25 ans	20	10 à 30 (fonction du réseau mais plus souvent 20 ans)	20

Tableau 32 - Synthèse hypothèses de dimensionnement - Catalogues

6 Exemple d'application de huit méthodes

En complément, à ces tableaux des exemples d'application de huit les guides/manuels/catalogues sont présentées en annexe.

Les méthodes choisies pour l'exemple sont les suivantes :

- ▶ Méthode Française (Norme NF P 98-086 – Logiciel Alizé)
- ▶ Guide AASHTO 1993
- ▶ Guide Japonais - Handbook for Asphalt Pavement 2019 - Inspiration AASHTO
- ▶ Guide DMRB 2006 – Méthode Anglaise
- ▶ Guide Canadien – Inspiration AASHTO
- ▶ Catalogue Espagnol (Norma 6.1 – Seccionnes de Firmes 2003)
- ▶ Catalogue Allemand EStO 12 –R1 2012
- ▶ Catalogue Sénégal – Inspiration Méthode Française

L'application de ces méthodes est faite à partir des hypothèses ci-dessous :

Type de structure	5 cm BB (Béton bitumineux) – BBSG Classe 2 – 7000 MPa (15°C, 10 Hz)
	8 cm EB (Enrobe bitumineux) – GB Classe 3
	15 cm GNTmini (240 Mpa à 360 MPa)
Type de plateforme	EV2mini = 80 à 120 MPa (80MPa)
Durée de dim	20 ans
TC20 ans (T4)	250000 PL
NE	0.075x10 ⁶

Le graphique ci-après synthétise les résultats obtenues pour chaque méthode. Les variations principales d'épaisseurs sont observées dans les pays avec des hivers beaucoup plus rigoureux qu'en France et par rapport aux caractéristiques des matériaux. Les catalogues présentent également des différences étant données que la structures doit répondre à une classe de trafic.

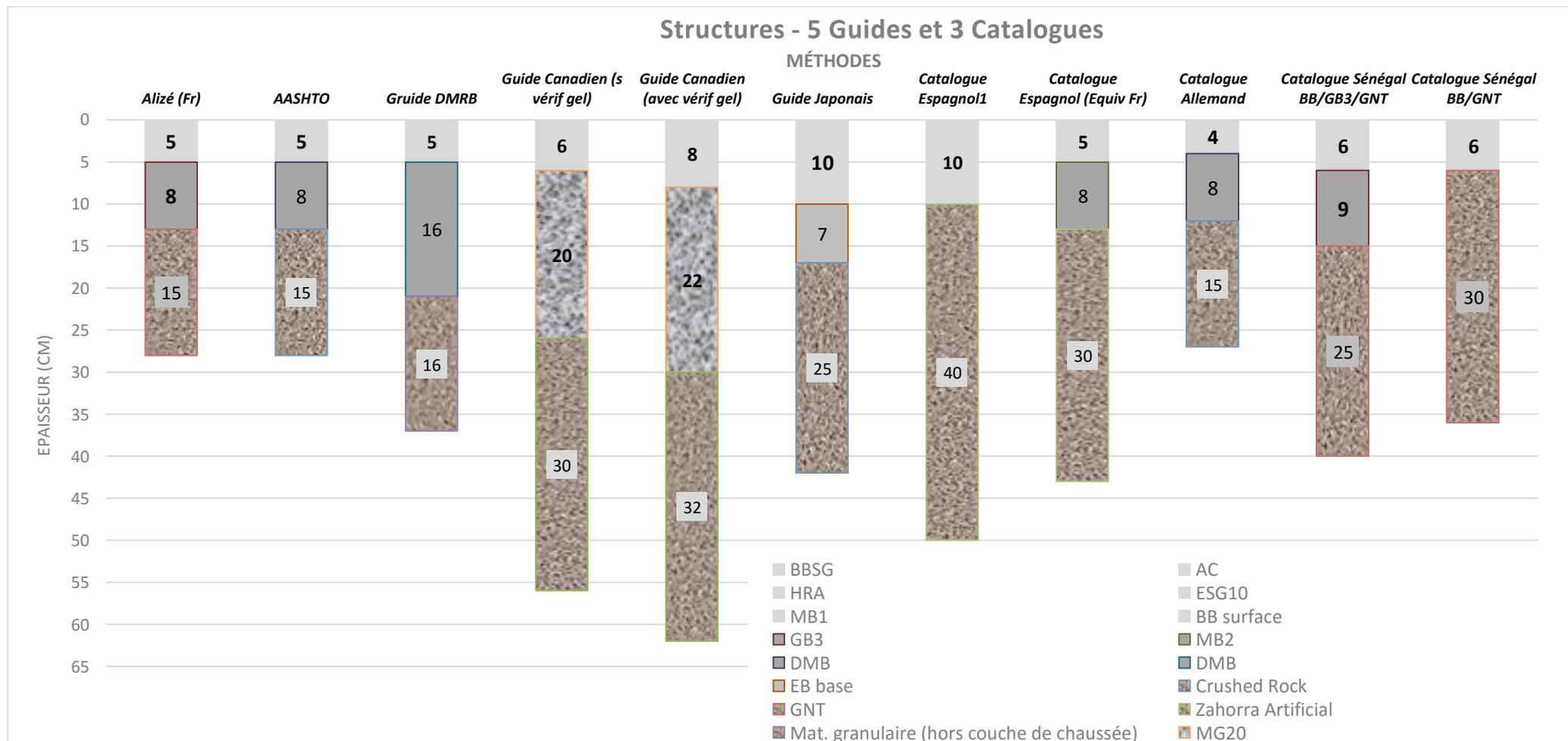


Figure 40 - Synthèse exemples application 8 méthodes/guides/catalogues - Structure 5BB/8GB3/15GNT/PF2

7 Conclusions

La présente étude bibliographique expose quelques méthodes de dimensionnements des chaussées souples et des routes non revêtues. La liste de méthodes n'est pas exhaustive, bien évidemment, il existe de nombreuses autres méthodes utilisées dans le monde. Comme chaque pays possède son propre climat, ses propres matériaux et son propre raisonnement, le nombre de méthodes de dimensionnement est très important.

On peut cependant distinguer deux grand type de méthodes : les méthodes empiriques et les méthodes rationnelles. Chaque méthode comporte certains avantages et des limites d'usage.

Comme les méthodes empiriques se basent sur les observation concrètes d'une section existante, elles sont plus difficilement adoptables dans un nouvel environnement.

Les méthodes rationnelles prennent en compte un nombre de paramètres important pour décrire le comportement de la chaussée : de ce fait une connaissance théorique de la méthode est nécessaire pour pouvoir l'utiliser dans de bonnes conditions. Comme ces méthodes sont entièrement paramétrables, elles peuvent être adaptées plus facilement à des conditions climatiques/géologiques différentes. Un exemple récent est le Catalogue du Sénégal, où la méthode française a été adaptée aux conditions sénégalaises. Dans le modèle théorique ont été introduites des valeurs expérimentales, issues de l'observation du comportement in situ des matériaux et de leurs propriétés mécaniques mesurées en laboratoire (caractéristiques des latérites, mesures de la température équivalente).

La fiabilité du calcul dépend de la qualité des hypothèses qui sont retenues. La justesse de ces hypothèses dépend de la qualité, du nombre et de la durée d'observation qui ont permis de les définir. Avec de nouvelles connaissances théoriques, les progrès techniques et de nouvelles observations du comportement réel des sections, la révision épisodique des méthodes paraît souhaitable. Par exemple :

- ▶ La mise à jour des catalogues avec de nouvelles fiches de structures en considérant de nouveaux types de matériaux (liants modifiés, fraisât d'enrobés, enrobés tièdes, enrobés à froid) ;
- ▶ La mise à jour des graphiques AASHTO qui déterminent les coefficients structuraux des matériaux a_1 a_2 , ils datent de 1993, et ne prennent pas en compte l'évolution des matériaux.
- ▶ La mise à jour des abaques sur lesquels certaines méthodes, tels que DMRB, s'appuient.

Malgré des graphiques, qui n'ont pas été mis à jour depuis 25 ans, la méthode AASHTO est très utilisée dans le monde. Les routes dimensionnées avec cette méthode ne semblent pas être sous-dimensionnées, cela peut être grâce aux coefficient de drainage.

La méthode de dimensionnement américaine prend en compte le drainage avec le coefficient m_i , qui a une grande importance dans la détermination des épaisseurs nécessaires. Pour obtenir une chaussée bien dimensionnée, qui présente la capacité structurelle (le SN) nécessaire, il convient de recourir à des matériaux présentant les caractéristiques nécessaires et un drainage adéquat. La modification des épaisseurs des couches granulaires est nécessaire en fonction de la qualité de drainage et des conditions climatiques du projet. Dans les autres méthodes étudiées l'importance du drainage n'est pas si accentuée, comme par exemple la méthode japonaise qui est fortement inspirée de la méthode AASHTO mais qui n'intègre pas de la même façon la notion de drainage de la chaussée.

Cette étude bibliographique permet de mettre en avant des recommandations allant dans le sens de l'importance qu'il faut apporter au comportement réel des matériaux routiers pour assurer une plus grande durée de vie à nos structures routières. Peu

Site internet : www.dvdc.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Christine LEROY et Simon POUGET

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

importe le choix de la méthode de dimensionnement utilisée, l'intégration de l'expérience locale dans l'estimation est primordiale.

Pour prendre en compte les caractéristiques réelles du sol et des matériaux granulaires dans le dimensionnement, l'observation in situ est indispensable. L'influence des phénomènes climatiques (durée et fréquence des périodes pluvieuses, gél-dégel) doit être également intégrée dans le dimensionnement.

Si la qualité des matériaux sur le site ne répond pas aux spécifications de conception (surestimation des caractéristiques), la structure de la chaussée ne pourra pas supporter le trafic prévu. Des fissures prématurées, des nids-de-poule ou d'autres dégradations de chaussée peuvent apparaître avant la fin de la durée de vie de la route.

D'autre part, si la qualité des matériaux est meilleure que celle requise dans les spécifications de la chaussée (caractéristiques sous-estimées), la chaussée sera « plus solide » que nécessaire. Cela signifie des couches plus épaisses de la structure de la chaussée et donc des coûts de construction plus élevés. Il ne faut cependant pas conclure directement sur ce sujet, car la notion d'entretien ultérieur peut avoir été intégrée dans les hypothèses retenues pour le dimensionnement.

8 Références Bibliographiques

- [1] Transport Research Laboratory Road note 31 - A guide to the structural design of bitumen surfaced roads in tropical and sub-tropical countries-1993
- [2] CEBTP - Guide Pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux - neuf 1984
- [3] AUSTRROADS part 2 2012
- [4] AASHTO guide for design of pavements structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993 (and 1998 for rigid pavement)
- [5] DMRB Design Manual for Roads and Bridges – Highways Agency, Volume 7, Section 2, Part 3 – HD 26/06, + Part 1 – Traffic Assessment - HD 24/06, february 2006
- [6] Catalogue de Dimensionnement des Chaussées Neuves de l'Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics (CTTP) Algérie - 2000
- [7] Norme Française NF P 98-086, Dimensionnement structurel des chaussées routières - 2011
- [8] Afrique du Sud SATCC – Code of Practice for the Design of Road pavements – 2001
- [9] Tanzanie – pavement and materials design manual – 1999
- [10] Viziret qualification et quantification des dégradations d'une route non revêtue pour la programmation et le suivi des travaux d'entretien – Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées n°213 - 1998
- [11] Catalogue de structure de chaussée espagnol – norma 6.1 IC secciones de formas*- 2003
- [12] Catalogue de structures de chaussées neuves et Guide de dimensionnement des chaussées au Sénégal – 2015
- [13] Journée technique LAVOC – Sara BRESSI; Performances des chaussées: attentes et exigences – 2012
- [14] Sandoumbé TRIAW - Projet de fin d'études ; Dimensionnement mécanistique-empirique des structures de chaussée: Application au tronçon Séo-Diourbel -- 2006
- [15] Laurent POROT, Lito ACHIMASTOS ; Pavement design comparisons - Pavement design methodes Article RGRA – 2003
- [16] Tarek AGAL – Projet de fin d'étude ; Développement d'un catalogue de dimensionnement structural des chaussées pour la ville de Montréal – 2005
- [17] Mélanie BOUTET, Pascale PIERRE, Guy DORE - Élaboration de modèles mathématiques pour l'interprétation des données obtenues avec le pénétromètre dynamique 2007
- [18] Dimensionnement structural des chaussées souples au MTQ logiciel Chaussée 2, Service des chaussées Ministère des Transports du Québec - 2018
- [19] Manual de Pavimentação IPR 719, DNIT - Rio de Janeiro – 2006
- [20] Catalogue de Structures Allemand - "Guidelines for the standardisation of pavement structures of traffic areas R1 – RstO 12; Edition 2012/Translation 2015
- [21] Manuel de dimensionnement Japonais - Handbook for Asphalt Pavement – Japan Road Association, 2019

- [22] Code de bonne pratique pour le dimensionnement des chaussées à revêtement hydrocarboné – Recommandations CRR – R 49/83

9 Abréviation et symboles

Trafic

AADT	average annual daily traffic
ESAL	equivalent single axle load
NE	nombre équivalents d'essieux de référence sur la période de calcul retenue
TMJA	trafic moyen journalier annuel

Support de chaussée

A,B,C,D,R,F	classes des sols et matériaux rocheux
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

Matériaux

BB	béton bitumineux
DMB	dense bound macadam (enrobés bitumineux denses)
EME2	enrobé à module élevé
ESU	enduit superficiel d'usure
GB	grave-bitume
GNT	grave non traitée (de type « A » ou « B »)
GW	gravel wearing course
HBM	hydraulic bound materials (Matériaux traités aux liants hydrauliques)
HDM	heavy duty macadam;
HRA	hot rolled asphalt (béton bitumineux à chaud) ;
MTLH	matériaux traités aux liants hydrauliques
SMA	stone mastic asphalt
TSCS	thin surface course system

Essais et grandeurs mesurées

CBR	California Bearing Ratio (%)
DCP	Dynamic Cone Penetrometer
D _c	déflexion caractéristique (mm/100)
D _m	déflexion moyenne (mm/100)
EV ₂	module à la plaque au second cycle de chargement (MPa)
IP	indice de plasticité (%)
IPI	indice portant immédiat, dit aussi CBR immédiat (%)
k	Coefficient de probabilité
OPM	optimum Proctor modifié (densité sèche ds et teneur en eau w)
w	teneur en eau (%)

Paramètres de dimensionnement

a	coefficients structuraux a1, a2...
b	pente de fatigue du matériau exprimée sous forme d'une loi bi-logarithmique
E	module d'Young utilisée pour caractériser la rigidité des matériaux (MPa)
E(θ , f)	module complexe d'un enrobé à la température θ et à la fréquence f (MPa)
$\varepsilon_{t,adm}$	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.
f	fréquence (Hz)
k_c	coefficient de calage
k_d	coefficient tenant compte dans le calcul des contraintes admissibles des discontinuités 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
ν	Coefficient de Poisson
r	risque de calcul (%)
$\sigma_{t,adm}$	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)
Sh	écart-type sur l'épaisseur de la couche de matériau mise en œuvre en assise (m)
SN	écart-type sur le logarithme du nombre de cycles entraînant la rupture par fatigue
θ	température de calcul (°C)
θ_{eq}	température équivalente (°C)
MR	Module élastique du sol de la plate-forme (en psi)
PSI	indice de viabilité de la chaussée (Present Serviceability Index)
Δ PSI	perte de niveau de service
E_{BS}	module de la couche de base (en psi)
E_{SB}	module de la couche de fondation (en psi)
RD	orniérage admissible en surface (en inches)
GL	perte de matériaux granulaire (en inches)
D_{BS}	épaisseur nécessaire de la couche de base (en inches)
D_{SB}	épaisseur nécessaire de la couche de fondation (en inches)
GL_A	perte annuelle moyenne de gravier (en inches)

Organismes

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
SETRA	Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
TRRL	Transportation and Road Research Laboratory

10 Annexe – Exemples d'application

Parmi les méthodes présentées dans le rapport, 8 ont été choisies pour l'exemple d'application, 4 guides (AASHTO, Guide Japonais, Guide Anglais DMRB, Guide Canadien) et 3 catalogues (Catalogue Espagnol, Catalogue Allemand, Catalogue du Sénégal)

La méthode française, conformément à la norme NF P 98-086 (2019) sera la méthode prise comme référence pour les données d'entrée qui seront utilisées pour l'application des méthodes qui seront présentées ci-après :

Type de structure	BB (Béton bitumineux) – BBSG Classe 2 – 7000 MPa (15°C, 10 Hz)
	EB (Enrobe bitumineux) – GB Classe 3
	GNTmini (240 Mpa à 360 MPa)
Type de plateforme	EV2mini = 80 à 120 MPa (80MPa)
Durée de dim	20 ans
TC20 ans (T4)	250000 PL
NE	0.075x10 ⁶

Tableau 33 - Hypothèses pour les exemples d'application des méthodes

Le tableau suivant regroupe les informations de chaque méthode :

Méthode	Essieu de référence	Température référence/ Matériaux/ Couche de forme	Durée de dimensionnement	Commentaires
Française (Norme NF P 98-086 – Logiciel Alizé)	13t	Tref 15°C/Portance PF	20	
AASHTO 1993	8,16t	Tref 20°C/CBR PF	20	Abaques/équations
Guide Japonais Handbook for Asphalt Pavement 2019	10t (mais 5t considérés pour définir les classes de trafic)	Caractérisation des matériaux par la stabilité Marshall/ CBR	10 (mais possibilité de prise en compte d'une durée différente)	Équations/ Inspiré d'AASHTO mais sans prise en compte du facteur de drainage
Guide DMRB 2006	Essieu de référence 8,16t; Température de référence = 20°C; dissociation du CBR et Classe de la Plateforme; les matériaux granulaires ne sont pas comptés comme couche de chaussée	Tref 20°C/ CBR	20	Abaques/équations
Guide Canadien	8,16t	Tref par région: 20,5°C au nord et 17,5°C au sud / CBR	25	Inspiré d'AASHTO mais apporte adaptations pour prendre en compte les hivers rigoureux
Catalogue Espagnol (Norma 6.1 – Seccionnes de Firmes 2003)	13t	Tref 20°C/CBR/ Portance	20	
Catalogue Allemand EStO 12 –R1 2012	10t	Non mentionné/ Portance	30	Application de facteurs de majoration/minoration en fonction de la zone climatique
Catalogue Sénégal	13t	Tref 34°C/Portance	10 à 30 (fonction du réseau) mais plus souvent 20 ans	Approche méthode française

Tableau 34 – Synthèse hypothèses des méthodes et catalogues utilisés pour l'exemple

10.1 Méthode Française

Les données concernant la méthode française ont déjà été présentées puisque c'est la méthode de référence utilisée pour l'exemple

10.2 Guide AASHTO 1993

- ▶ NE 8t : 0,77 x 106 (Formule Guide SETRA/LCPC 94 – Coefficients chaussées souples et bitumineuses)
- ▶ Type route : Local
- ▶ Durée de vie : 20 ans ;
- ▶ Plateforme (CBR=11%): 82 MPa
- ▶ Couche de roulement : AC CI2 – 4690 MPa (20°C, 10Hz)
- ▶ Couche de base : DMB 6120 MPa (20°C, 10Hz)
- ▶ Couche de fondation : Matériaux granulaire (Crushed Roc) 240 Mpa
- ▶ Risque : Reliability (f du type de réseau) = 80% (Local)

Structure retenue : 5AC + 8DMB + 15CR

Agressivité 13t vers 8,1t		
	Formule Guide SETRA	Formule AASHTO
Souple et bitumineuse		
K	1	1
α	5	4
P	13	13
P0	8,16	8,16
A	10,3	6,4
NE _{8,16t}	7,70E+05	4,83E+05

Autres calculs/entrants						
Matériaux	Mpa (15°C)	Psi (15°C)	Mpa (20°C)	Psi (20°C)	Abaque AASHTO (ai)	Equation ai
BBSG	7000	1 015 264	4 690	680 227	a1 - fig 2.5 II.18	0,50
GB3	9000	1 305 339	6 120	887 631	a2 - fig 2.9 II.23	0,35
GNT	240	34 809			a3 - fig 2.7 II.21	0,227*logE(Psi)-0,839

FLEXIBLE PAVEMENT

		Si comparé au trafic français (13t à 8,16t)				
		TC	CAM (13t)	NE 13t	CAM (8,16t)	NE 8,16t
W18	7,70E+05	250000	0,3	7,50E+04	10,3	7,70E+05
R	80					
ZR	-0,841					
S0	0,45					
CBR subgrade	11	2555	CBR0.64			
MR	11854	psi				
P0	4,2					
Pt	2					
DPSI	1,7					
SN		inches				
			SN tel que W18 =			6,35E+00

AC	EAC 20°C (psi)	680 227	SN1	
	EAC 20°C (Mpa)	4690	D1* (psi)	
	a1	0,5	D1 (psi)	1,97
			D1 (mm)	50
AC	EBS 20°C (psi)		SN2	
	EBS 20°C (Mpa)		D2* (psi)	
	a2	0,40	D2 (psi)	0,00
	m2	1	D2 (mm)	0
DBM	EBS (psi)	887 631	SN2	
	EBS (Mpa)	6120	D2* (psi)	
	a2	0,35	D2 (psi)	3,15
	m2	1	D2 (mm)	80
CR	ESB (psi)		D3* (psi)	
	ESB (Mpa)		D3 (psi)	5,91
	a3	0,190	D3 (mm)	150
	m3	1,25		
CSG	ESB (psi)		D3* (psi)	
	ESB (Mpa)		D3 (psi)	0,00
	a3	0,150	D3 (mm)	0
	m3	1,25		
		SN adm	3,49	
			-0,4	
			6,1	
			1,2	
			-0,2	
		W18 adm	4,69E+06	

PAVEMENT DESIGN

W18	7,70E+05
W18 adm	4,69E+06

Vérification
W18adm>W18

10.3 Méthode Canadien

La méthode est fortement inspirée de la Méthode AASHTO avec des coefficients différents pour les matériaux granulaires à cause des hivers rigoureux. Le IR maxi en France est égal à 420°C/J alors que la valeur min considéré dans la méthode canadienne est égale à 600°C/J

- ▶ Type route : Local
- ▶ Durée de vie : 25 ans ;
- ▶ NE8t : $0,77 \times 10^6$
- ▶ Couche de roulement : ESG10 – 3500 MPa (17,5°C, 10Hz)
- ▶ Couche de base : granulaire MG20
- ▶ Couche de fondation : granulaire MG112
- ▶ Plateforme (CBR=11%): 82 Mpa

- ▶ Épaisseur mini pour Indice de gel mini de 600°C/J : 620 mm
- ▶ Risque : Reliability (f du type de réseau) = 66% (Local)

Transports Québec

NORME

STRUCTURES DE CHAUSSÉE

Tomme
II

Chapitre
2

Page
3

Date
2014 01 30

Tableau 2.4-1
Critères de conception – Chaussées souples neuves ou faisant l'objet d'un décohesionnement ou d'un remplacement complet du revêtement

Classification de la route	DJMA projeté	Période de conception (années)	Structural ⁽¹⁾		Soulèvement au gel ⁽²⁾ maximal (mm)
			Perte de viabilité maximale (Δ PSI)	Fiabilité statistique minimale (%)	
Locale	< 1 000	25	2,0	66	70
	> 1 000			70	
Collectrice et régionale	< 2 000	25	2,0	70	60
	2 000–3 000			75	
	> 3 000			80	
Nationale	< 5 000	25	2,0	80	55
	5 000–20 000	30	2,0	85	55
	> 20 000	30	1,75	90	50
Autoroute	< 20 000	30	1,75	90	50
	> 20 000			95	

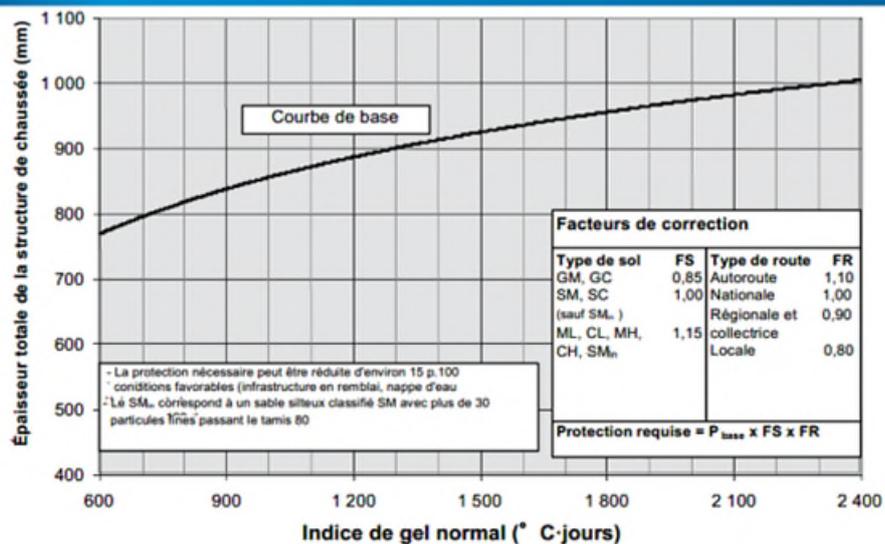
1. Perte de viabilité exprimée suivant l'indice de viabilité de l'AASHTO et le facteur de fiabilité R en assumant un écart type S_0 de 0,45.

2. Effets du gel admis pour une période de récurrence égale à la demi-période de conception.

FLEXIBLE PAVEMENT		Si comparé au trafic français (13t à 8,16t)				
		TC	CAM (13t)	NE 13t	CAM (8,16t)	NE 8,16t
W18	7,70E+05	250000	0,3	7,50E+04	10,3	7,70E+05
R	66					
ZR	0,412					
S0	0,45					
CBR subgrade	12	2555CBR0.64				
MR	12533	psi		0,2		
P0	4,2			0,0		
Pt	2			1,2		
DPSI	2,0			0,0		
SN		inches				
						SN tel que W18 = 2,65E+01

EB r	EAC 17,5°C (psi)	0	SN1		Gel (ajout)
	EAC 17,5°C (Mpa)	3500	D1* (psi)	2,36	
	a1	0,47	D1 (psi)	60	80
			D1 (mm)		
	EBS 20°C (psi)		SN2		
	EBS 20°C (Mpa)		D2* (psi)	0,00	
	a2	0,40	D2 (psi)	0	
	m2	1	D2 (mm)		
	EAC 17,5°C (psi)		SN2		
	EAC 17,5°C (Mpa)		D2* (psi)	0,00	
	a2		D2 (psi)	0	
	m2		D2 (mm)		
MG20	ESB (psi)		D3* (psi)		
	ESB (Mpa)		D3 (psi)	7,87	
	a3	0,080	D3 (mm)	200	
	m3	0,8			220
MG112	ESB (psi)		D3* (psi)		
	ESB (Mpa)		D3 (psi)	11,81	
	a3	0,090	D3 (mm)	300	
	m3	0,8			320
			SN adm	2,46	
				0,2	
				5,1	W18 adm
				1,2	
				-0,1	
				2,27E+06	

Protection contre le gel (1994)



	200	
Pbase		775
FR		0,8
FS		1
Protection require =		620

CONCLUSION

Total Pavement Thickness (excluding capping layer) :	560 mm 22 inch
--	---------------------------------

PAVEMENT STRUCTURE (EXCLUDING CAPPING LAYER)

Layer	Material	Thickness (mm)	Thickness (inch)
AC	asphalt	60	2,4
AC	asphalt	0	0,0
DBM	asphalt	0	0,0
CR	granular	200	7,9
CSG	granular	300	11,8

Protection requise gel (mm) =	620 mm
	60

Structure calculée : 6 ESG10 + 20 MG20 + 30 MG112

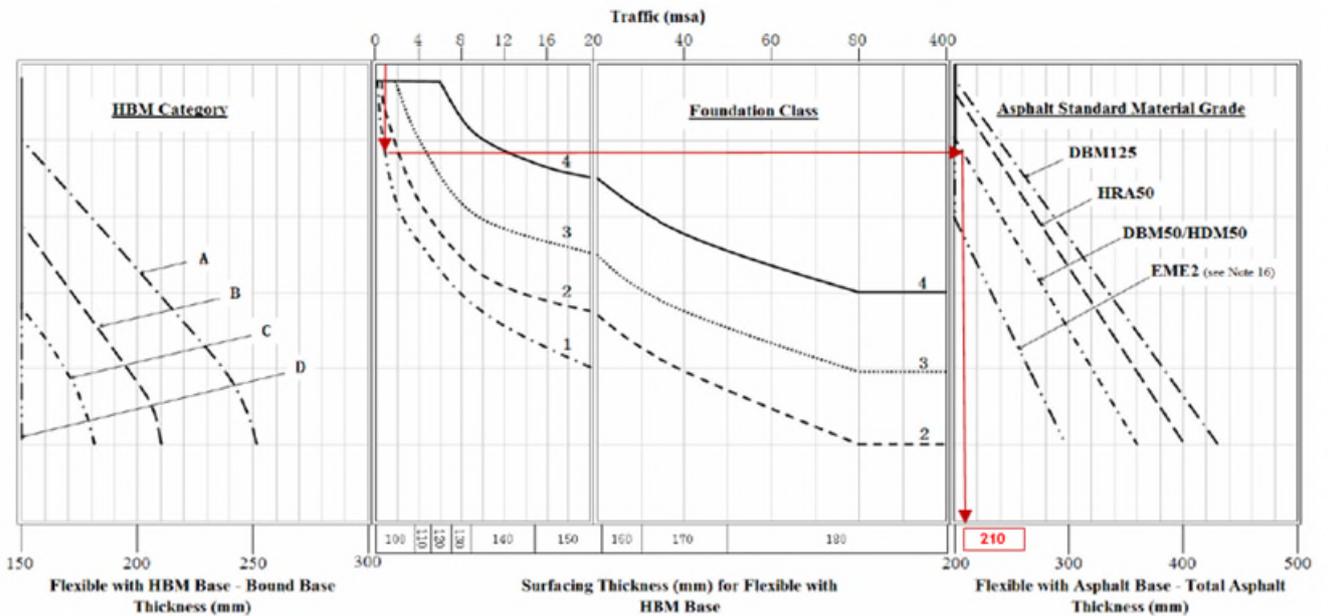
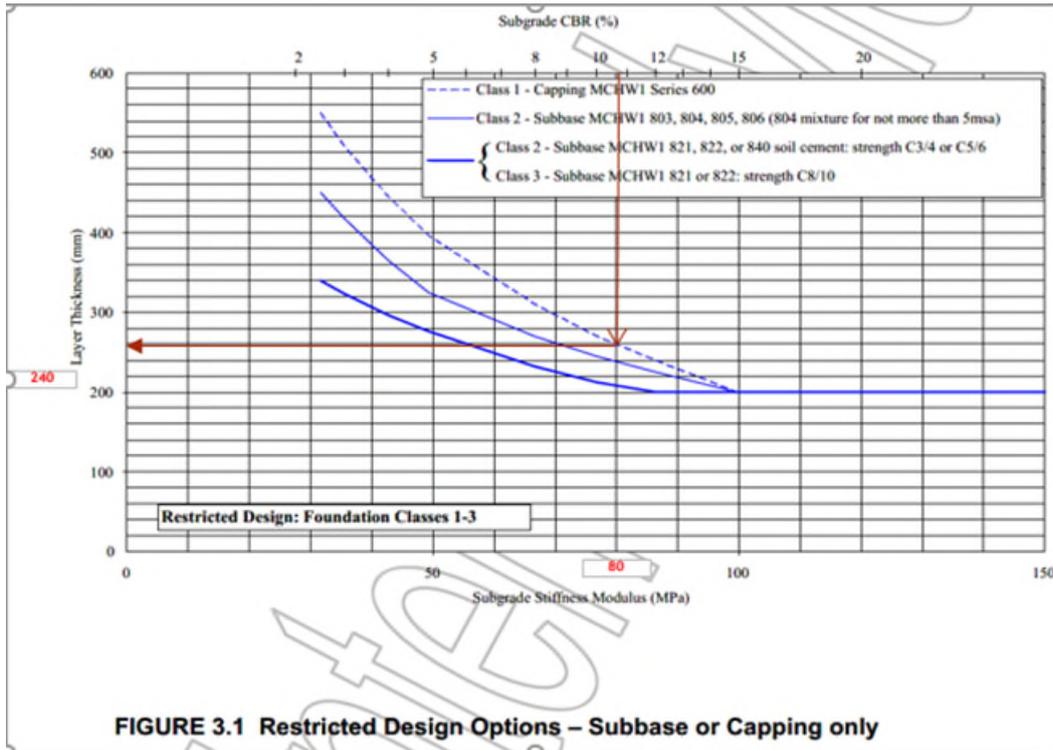
Ajout de 60 cm

Structure après vérification au gel : 8 ESG10 + 22 MG20 + 32 MG112

10.4 Guide DMRB

Le guide est basé sur l'utilisation d'abaques en fonction du type de structure et de la portance de la plateforme (CBR)

- ▶ Type route : Local
- ▶ Durée de vie : 20 ans ;
- ▶ NE8t : 0,77 x 106
- ▶ Couche de roulement : HRA – 4690 MPa (20°C, 10Hz)
- ▶ Couche de base : DMB 6120 MPa (20°C, 10Hz)
- ▶ Couche de fondation (subbase hors structure de chaussée): Matériaux granulaire
- ▶ Plateforme (CBR=11%): 82 Mpa – Class 1



- ▶ Épaisseur totale couche bitumineuse égale à 210 mm, décomposée en couche de roulement et couche de base.

Structure retenue :

21 DMB (5HRA + 16DMB) + 16 Mat Granulaire (hors structure chaussée)

10.5 Guide Japonais

Ce Guide est Inspiré de la Méthode AASHTO mais le drainage n'est pas pris en compte dans les calculs de TA (épaisseur requise en fonction du risque de dimensionnement). Dans la méthode, les dispositifs de drainage sont sensés garantir le drainage de la chaussée en toute saison, donc aucun coefficient lié au drainage des couches n'est associé aux matériaux.

Compte tenu les hivers rigoureux au Japon, le TA peut être corrigé pour garantir la résistance au gel.

- ▶ Durée de vie : 10 ans mais possibilité de prendre en compte d'autres durées de vie en faisant le ratio par rapport à 10 ans;
- ▶ NE_{5t} : $8,9 \times 10^6$ (même si l'essieu de référence est de 10t les casses de trafic sont prises en compte par demi-essieu) – Classe N6

Table 2-5 Reference values for the number of wheel loads inducing fatigue failure

Traffic volume class	Designed daily volume for pavement (Unit: vehicles/day per direction)	Number of wheel loads inducing fatigue failure (Unit: times/10 years)
N ₇	3,000 or more	35,000,000
N ₆	1,000 - 2,999	7,000,000
N ₅	250 - 999	1,000,000 /
N ₄	100 - 249	150,000
N ₃	40 - 99	30,000
N ₂	15 - 39	7,000
N ₁	0 - 14	1,500

- ▶ Plateforme CBR=11%
- ▶ TA (cm) = épaisseur mini de la chaussée -> reliability ->Type de réseau
- ▶ 50% reliability -> $TA_{mini} = [3,07 \times (N)^{0,16}]/(CBR)^{0,3}$ comparé à $T'A = \sum a_i (f \text{ matériau et trafic}) \times h_i$
- ▶ Épaisseur mini -> CBRsubgrade
- ▶ Caractérisation des matériaux par l'essai la stabilité Marshall
- ▶ Épaisseurs mini par rapport aux différents paramètres :

TA (cm)	Epaisseur mini f CBR	Epaisseur mini couche de surface f trafic	Correction TA pour IA = 600 °C/J
19	entre 14 et 18 cm	15 cm	14cm

- ▶ Épaisseurs calculées par rapport aux types de matériaux :

	a	h	T	
Couche de surface (BB)	1	10	10	
couche de base (EB)	0,8	7	5,6	
Couche de fondation (Crusher-run)	0,25	25	6,25	
			22	OK

Structure retenue:

10 BB (CdR+Couche de liaison) + 7EB + 25 CR (matériau granulaire)

10.6 Catalogue Espagnol - Norme 6.1 IC-Seccionnes de Firmes_2003

Permet l'utilisation d'autres matériaux inscrits dans le catalogue par l'application de coefficient.

- ▶ $NE_{13t} : 0,075 \times 10^6$
- ▶ Trafic T41
- ▶ Plateforme : E1 ($E_{v2} \geq 60\text{MPa}$)
- ▶ Paramètres CBR et déflexion
- ▶ E1 x T42 : Structure 4111



Norme espagnole – Structure 4111		
Matériaux	MB	ZA
Épaisseur (cm)	10	40
Équivalences	1	0,25
Ep x Coef Equiv	10	10
Capacité de support	20 (10+10)	

A partir des équivalences il est possible d'obtenir une structure avec d'autres matériaux dont la capacité de support est supérieure ou égale à la structure d'origine ($20.5 > 20$) :

Equiv BB/GB3/GNT	MB CdR	MB base	ZA
Épaisseur (cm)	5	8	30
Équivalences	1	1	0,25
Ep x Coef Equiv	5	8	7,5
Capacité de support	20,5 (5+8+7.5)		

Structure retenue:

5 MB CdR + 8MB base + 30 ZA (matériau granulaire)

10.7 Catalogue Sénégal

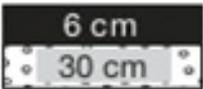
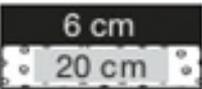
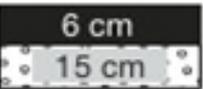
Approche française avec la prise e, compte de facteurs climatiques et caractéristiques des matériaux sénégalais.

- ▶ NE13t : 0,075 x 106
- ▶ Trafic C1
- ▶ Plateforme : PF2qs
- ▶ Une plateforme à partir de PF2qs n'est prise en compte pour trafic C1

4. BBSG / GB3 / GNT1

	PF2 50 à 80 MPa	PF2qs 80 à 120 MPa	PF3 120 à 200 MPa
C1 NE<0.1 10 ⁶			

13. BBSG / GNT1

	PF2 50 à 80 MPa	PF2qs 80 à 120 MPa	PF3 120 à 200 MPa
C1 NE<0.1 10 ⁶			

Structure BBSG/GB3/GNT : 6 BBSG + 9 GB3 + 25 GNT

Si utilisation que des matériaux non traités :

Structure BBSG/GNT : 6 BBSG + 20 GNT

10.8 Catalogue Allemand RSt012

- ▶ NE10t : 0,28 x 10⁶ – Classe BK0,3
- ▶ Plateforme : F2/F3
- ▶ Durée de vie de 30 (tous les réseaux)
- ▶ Une minoration ou une majoration de l'épaisseur de la structure peut être effectuée en fonction de la région climatique. Pour l'exemple, zone climatique neutre a été choisie.

Line	Load class	BK100				BK32				BK10				BK3.2				BK1.8				BK1.0				BK0.3			
	B [million of ESALs]	> 32				> 10 - 32				> 3.2 - 10				> 1.8 - 3.2				> 1.0 - 1.8				> 0.3 - 1.0				≤ 0.3			
	Thickness of frost resistant pavement structure ¹⁾	55	65	75	85	55	65	75	85	55	65	75	85	45	55	65	75	45	55	65	75	45	55	65	75	35	45	55	65
3	Asphalt base course and crushed rock base course on frost blanket course																												
	Asphalt surface course																												
	Asphalt base course	12				12				10				10				4				4							
	Crushed rock base course ⁷⁾ E _{v2} ≥ 150(120)	18				14				10				15				15				15							
	Frost blanket course	15				15				15				15				15				15							
Thickness of frost blanket course	-	-	30 ²⁾	40	-	-	34 ²⁾	44	-	28 ²⁾	38	48	-	-	30 ²⁾	40	-	24 ²⁾	34	44	16 ²⁾	26	36	46	-	18 ²⁾	28	38	

Structure retenue :

4 AC + 8 AC base + 27 CR (matériau granulaire)