

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



GC. 484

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
Centre de Thiès

Département de génie civil

PROJET DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

Titre :

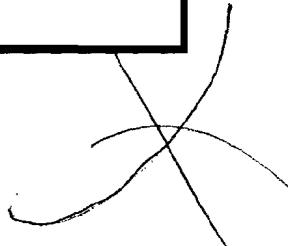
ELABORATION D'UN CATALOGUE DES STRUCTURES TYPES DE CHAUSSEES NEUVES AU
SENEGAL

Auteur : Cheikh Yatt DIOUF

Directeur interne : Pr. Ibrahima Khalil CISSE

Directeur externe : Lamine CISSE, A.A.T.R.

Juillet 2007



DEDICACES

*A mes parents,
A mes frères et sœurs,
Aux nobles enseignants rencontrés tout au long de ma scolarité,
Au défunt camarade de promotion Abdoulaye FADIGA,
A toute la famille de l'ESP.*

REMERCIEMENTS

J'aimerais exprimer toute ma reconnaissance aux personnes qui ont contribué à l'accomplissement de ce travail. Plus particulièrement :

- le Pr Ibrahima Khalil CISSE, directeur de l'E.P.T., pour l'intérêt qu'il porte au sujet, son encadrement et son soutien continu et la mise à notre disposition de documents de base.
- Mr Lamine CISSE, directeur de la division Programmation et BDR à l'A.A.T.R., pour la formulation du sujet, l'aide bibliographique et la supervision de l'étude.
- Messieurs Souleymane KONE de l'AGEROUTE (Côte d'Ivoire), Dominique NDONG de l'AATR et Sakhir NIASS de l'APIX pour avoir accepté de relire le rapport et d'y apporter leurs corrections.
- Messieurs Ousmane MBODJI de la 4^{ème} promotion, Ibrahima CISSOKHO et Serigne Modou GUEYE de la 5^{ème} promotion pour l'orientation apportée au sujet à travers leurs précédents PFE.

SOMMAIRE

Le but de ce travail était d'élaborer en fonction des matériaux disponibles et des facteurs économiques, un catalogue sénégalais des structures types de chaussées neuves. Nous devons, à cet effet, produire d'une part, des fiches de matériaux présentant les caractéristiques et spécifications auxquelles devront satisfaire les matériaux routiers ainsi que les hypothèses de dimensionnement ; et d'autre part, des fiches de structures permettant selon la classe de plateforme (S2, S3, S4 et S5) et la classe de trafic (T1, T2, T3, T4, T5 et T6) de déterminer les épaisseurs des matériaux d'assise et du revêtement.

L'étude s'est principalement appuyée sur une recherche bibliographique très diversifiée dans le but d'identifier les matériaux utilisables en construction routière au Sénégal, d'exposer la méthode rationnelle de dimensionnement, de déterminer pour chaque matériau les caractéristiques mécaniques (module d'Young, coefficient de Poisson ainsi que les caractéristiques en fatigue b , ε_6 et/ou σ_6). Une fois ces informations collectées, nous avons déterminé les contraintes et déformations admissibles pour chaque matériau, puis calculé différentes variantes de structures à l'aide du logiciel ALIZE III.

Ainsi, en plus de quatorze (14) fiches de matériaux, nous sommes parvenus à produire trente-et-une (31) fiches de structures réparties comme suit : vingt-quatre (24) pour les structures souples, six (6) pour les structures de semi-rigides, une (1) pour les structures mixtes. Le revêtement pour toutes ces structures était constitué d'un béton bitumineux.

L'analyse globale des fiches de structures nous a permis de voir que pour des trafics allant de T1 à T3, les chaussées souples réalisées à partir des matériaux naturels convenaient. Par contre, pour des trafics plus élevés (T4 à T6), les structures utilisant des matériaux d'assise traités, soit aux liants hydrauliques, soit aux liants hydrocarbonés, sont plus adaptées. Il s'agit des chaussées semi-rigides, à structure mixte ou des chaussées souples à couche de base en grave-bitume.

Mots clés : catalogue – dimensionnement – matériaux – fiches de structures

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Sommaire	iii
Tables des matières	iv
Listes des annexes	vii
Listes des figures	ix
Listes des tableaux	x
Listes des tableaux des annexes	xii
Listes des abréviations et notations	xiv
INTRODUCTION GENERALE	- 1 -
I. GENERALITES SUR LES ROUTES	- 3 -
I.1. Présentation sommaire du réseau routier sénégalais	- 3 -
I.1.1. Le réseau classé.....	- 3 -
I.1.2. Caractéristiques générales du réseau	- 3 -
I.1.3. État du réseau classé	- 4 -
I.1.4. Trafic.....	- 4 -
I.2. Description matérielle d'une chaussée	- 5 -
I.3. Types de structures de chaussées utilisées au Sénégal.....	- 7 -
I.3.1. Les chaussées souples	- 7 -
I.3.2. Les chaussées semi-rigides.....	- 8 -
I.3.3. Les chaussées rigides	- 9 -
I.3.4. Les chaussées à structure mixte	- 9 -
I.4. Description fonctionnelle des couches de la chaussée	- 10 -
I.4.1. La plate-forme.....	- 10 -
I.4.2. La sous-couche	- 11 -
I.4.3. Les couches d'assise.....	- 12 -
I.4.4. La couche de surface	- 12 -
I.5. Fonctionnement et endommagement des différents types de chaussées.....	- 13 -
I.5.1. Les chaussées souples	- 13 -
I.5.2. Les chaussées semi-rigides.....	- 15 -
I.5.3. Les structures mixtes	- 16 -

II. INVENTAIRE DES MATERIAUX ROUTIERS AU SENEGAL	- 18 -
II.1. Les matériaux utilisés en assise de chaussée.....	- 18 -
II.1.1. Les matériaux non traités.....	- 18 -
II.1.2. Les graveleux latéritiques	- 20 -
II.1.3. Les matériaux traités aux liants hydrauliques	- 21 -
II.1.4. Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés.....	- 22 -
II.2. Les matériaux utilisés en couche de roulement.....	- 24 -
II.2.1. Les enduits superficiels.....	- 24 -
II.2.2. Les enrobés denses	- 25 -
II.2.3. Les bétons bitumineux	- 25 -
II.2.4. Le sand-asphalt	- 26 -
III. PRESENTATION DES METHODES DE DIMENSIONNEMENT	- 28 -
III.1. L'approche empirique	- 28 -
III.1.1. La méthode du CBR	- 29 -
III.1.2. La méthode du Road Research Laboratory.....	- 30 -
III.1.3. Les méthodes dérivées des essais AASHO	- 33 -
III.1.4. La méthode du CEBTP	- 36 -
III.2. L'approche théorique et ses modèles mathématiques	- 39 -
III.2.1. Le modèle de Boussinesq (1885).....	- 41 -
III.2.2. Les modèles bicouches	- 43 -
III.2.3. Le modèle multicouches de Burmister.....	- 46 -
IV. EXPOSE DE LA METHODE FRANCAISE DE DIMENSIONNEMENT	- 48 -
IV.1. Les données requises pour le dimensionnement.....	- 48 -
IV.1.1. Le trafic.....	- 48 -
IV.1.2. Les paramètres de base du calcul.....	- 51 -
IV.1.3. Les conditions climatiques et environnementales.....	- 52 -
IV.1.5. Les caractéristiques des matériaux	- 54 -
IV.2. Présentation de la démarche de dimensionnement	- 55 -
IV.2.1. Prédimensionnement.....	- 56 -
IV.2.2. Calcul de la structure.....	- 56 -
IV.2.3. Vérification en fatigue de la structure et de la déformation du support.....	- 56 -
IV.2.4. Ajustement des épaisseurs calculées.....	- 57 -
IV.2.5. Définition de la coupe transversale.....	- 57 -
IV.3. Dimensionnement des différents familles de structures	- 58 -
IV.3.1. Sol-support et couches non liées.....	- 58 -
IV.3.2. Chaussées souples et bitumineuses épaisses	- 59 -

IV.3.3. Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	- 61 -
IV.3.4. Chaussées à structure mixte	- 64 -
V. ELABORATION DU CATALOGUE SENEGALAIS.....	- 67 -
V.1. Les données d'entrées de base.....	- 67 -
V.1.1. La durée de vie	- 67 -
V.1.2. Le trafic.....	- 67 -
V.1.3. Valeurs du CAM.....	- 68 -
V.1.4. Taux de croissance annuel du trafic des poids lourds.....	- 68 -
V.1.5. Les caractéristiques de la plate-forme support de chaussée.....	- 69 -
V.1.6. Les conditions climatiques.....	- 70 -
V.1.7. Les caractéristiques mécaniques des matériaux.....	- 71 -
V.1.8. Choix de la couche de roulement	- 72 -
V.1.9. Épaisseurs minimales et maximales de mise en œuvre des matériaux.....	- 73 -
V.1.10. Liaison aux interfaces	- 73 -
V.2. Les scénarios de structures.....	- 73 -
V.2.1. Les chaussées souples	- 74 -
V.2.2. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	- 75 -
V.2.3. Les chaussées à structure mixte	- 75 -
V.3. Structure du catalogue.....	- 75 -
V.3.1. La notice d'utilisation	- 76 -
V.3.2. Les fiches de structures.....	- 76 -
V.3.3. Les fiches de matériaux.....	- 76 -
V.4. Estimations des coûts et optimisation des solutions.....	- 76 -
V.5. Exemple d'utilisation du catalogue	- 77 -
V.5.1. Choix d'une chaussée souple.....	- 78 -
V.5.2. Choix d'une chaussée semi-rigide.....	- 78 -
V.5.3. Choix d'une chaussée à structure mixte.....	- 79 -
CONCLUSION	- 81 -
RECOMMANDATIONS.....	- 83 -

LISTES DES ANNEXES

Annexes A : Fiches de matériaux : caractérisation et hypothèses de dimensionnement

Sol de plateforme.....	A0
FM 1 : Sable naturel (SN).....	A1
FM 2 : Grave naturelle (GN).....	A2
FM 3 : Grave non traitée (gnt) et Grave reconstituée humide (GRH).....	A3
FM 4 : Graveleux latéritiques crus (LAT).....	A4
FM 5 : Graveleux latéritiques améliorés aux concassés (LACo).....	A5
FM 6 : Graves traitées aux liants hydrauliques (GC).....	A6
FM 7 : Graveleux latéritiques traités au ciment (LAC).....	A7
FM 8 : Sables traités au ciment (SC).....	A7
FM 9 : Grave-bitume (GB) / Grave-émulsion (GE).....	A8
FM 10 : Sable-bitume (SB).....	A9
FM 11 : Enduits superficiels (ESU).....	A10
FM 12 : Béton bitumineux (BB).....	A11
FM 13 : Enrobés denses (ED).....	A12
FM 14 : Sand asphalt (SA).....	A11

Annexes B : Fiches de structures

S2 : SN / GN.....	B1
S3 : SN / LAT2.....	B2
S4 : SN / LACo.....	B3
S5 : SN / GNT.....	B4
S6 : SN / GRH.....	B5
S7 : LAT1 / LAT2.....	B6
S8 : LAT1 / GN.....	B7
S9 : LAT1 / GNT.....	B8
S10 : LAT1 / LACo.....	B9
S11 : LAT1 / GRH.....	B10
S12 : LAT2 / GB.....	B11
S13 : GN / GN.....	B12
S14 : GN / LAT2.....	B13
S15 : GN / LACo.....	B14
S16 : GN / GNT.....	B15
S17 : GN / GRH.....	B16
S19 : GNT / GNT.....	B17
S20 : GNT / LAT2.....	B18
S21 : GNT / LACo.....	B19
S22 : GNT / GRH.....	B20
S23 : GRH / GRH.....	B21
S24 : GRH / LACo.....	B22
S25 : LACo / LACo.....	B23
S26 : LACo / GB.....	B24
H2 : LAC / LAC.....	B25
H4 : LAT1 / LAC.....	B26
H5 : GN / LAC.....	B27
H6 : GNT / LAC.....	B28
H7 : GRH / LAC.....	B29
H8 : LACo / LAC.....	B30
M2 : LAC / GB.....	B31

Annexes C : Résultats du calcul des structures sur ALIZE III**(voir document 2)**

LISTES DES FIGURES

Figure I.1 – Structure du trafic motorisé en 2002 [17].....	- 5 -
Figure I.2: Coupe transversale d'une chaussée [1].....	- 6 -
Figure I.3 : Familles de structures de chaussée [1].....	- 8 -
Figure I.4 : Détérioration de la chaussée par l'action des charges lourdes [13].....	- 14 -
Figure I.5 : Illustrations de quelques dégradations rencontrées sur les chaussées	- 14 -
Figure II.1 – Différents types d'enduits superficiels [5].....	- 25 -
Figure III.1 : Abaque du corps des Ingénieurs de l'Armée Américaine [11].....	- 29 -
Figure III.2 : Road Note N°29 : Couche de fondation en matériaux non traités [11].....	- 31 -
Figure III.3 : Road Note N°29 : Couche de surface souples et couches de base en macadam enrobé[11]	- 31 -
Figure III.4 : Road Note N°29 : Couche de surface souples et couches de base en macadam non traité [11].....	- 31 -
Figure III.5 : Road Note N°29 : Couche de surface souples et couches de base en béton bitumineux [11].....	- 32 -
Figure III.6 : Road Note N°29 : Couche de surface souples et couches de base traitées aux liants hydrauliques [11].....	- 32 -
Figure III.7 : Road Note N°29 : Dalle de béton [11].....	- 32 -
Figure III.8 : Méthode Shell : calcul du trafic équivalent N en nombre d'essieux de 10t [11]	- 34 -
Figure III.9 : Méthode Shell : détermination des épaisseurs de chaussée [11].....	- 35 -
Figure III.11 : Diffusion des pressions dans un massif de Boussinesq [2].....	- 42 -
Figure III.12 : Schéma du modèle de Hogg.....	- 43 -
Figure III.13 : Schéma du modèle de Westergaard.....	- 45 -
Figure III.14 : Schéma du modèle de Burmister.....	- 46 -
Figure IV.1 : Schématisation de la charge de référence pour le calcul des structures	- 56 -
Figure IV.2 : Détermination des épaisseurs de la couche de surface en matériaux bitumineux [7].....	- 59 -

LISTES DES TABLEAUX

Tableau I.1 – Inventaire du réseau routier classé en 2002 [18].....	- 3 -
Tableau I.2 – Évolution du trafic entre 1996 et 2002 [17].....	- 5 -
Tableau I.3 – Classe de plate-forme selon le CEBTP [10].....	- 11 -
Tableau III.1 : Classes de trafic utilisées dans la méthode CEBTP [11].....	- 37 -
Tableau III.2 : Épaisseur des couches de chaussée selon la méthode CEBTP [11].....	- 38 -
Tableau III.3 : Épaisseur des couches de chaussée selon la méthode CEBTP [11].....	- 38 -
Tableau III. 4 : Nature des matériaux utilisables en corps de chaussée [11].....	- 39 -
Tableau IV.1: Répartition du trafic poids lourds par voie de circulation.....	- 49 -
Tableau IV.2: Classes de trafic LCPC-SETRA [7].....	- 49 -
Tableau IV.3: Valeurs de K et α pour le calcul de l'agressivité d'un essieu (structures neuves moyen et fort trafic) [7].....	- 50 -
Tableau IV.4 : Coefficients d'agressivité selon le trafic et le type de chaussée [7].....	- 51 -
Tableau IV.5 : Risque de calcul retenu à 20 ans pour le Catalogue 1977 des chaussées des routes nationales [7].....	- 52 -
Tableau IV.6 : Classe de portance à long terme au niveau de l'arase de la PST [7].....	- 52 -
Tableau IV.7 : Classe de portance à long terme des plates-forme.....	- 53 -
selon le Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic LCPC-SETRA, 1981 [9].....	- 53 -
Tableau IV.9 : Écart-type sur les épaisseurs à la mise en oeuvre de couches en matériaux bitumineux [7].....	- 55 -
Tableau IV.10 : Valeurs du coefficient d'agressivité moyenne du trafic pour la justification de la tenue du sol support [7].....	- 58 -
Tableau IV.11 : Valeurs du coefficient k_c pour les chaussées bitumineuses [7].....	- 61 -
Tableau IV.12 : Valeurs du coefficient k_r [7].....	- 61 -
Tableau IV.13 : Valeurs du coefficient k_c pour chaussées en MTLH.....	- 64 -
Tableau IV.14: Valeurs du coefficient k_s [7].....	- 64 -
Tableau IV.15 : Valeurs du risque de calcul r_2 pour la couche en MTLH [7].....	- 65 -
Tableau V.1: Classe de trafic définies pour l'étude.....	- 67 -
Tableau V.2 : Équivalence entre les différentes classes de trafic.....	- 67 -
Tableau V.3 : Valeurs du CAM pour le dimensionnement des structures du catalogue.....	- 68 -
Tableau V.4 : Valeurs du CAM pour la définition des classes de trafic cumulé.....	- 68 -
Tableau V.5 : Nombre d'essieux équivalents NE utilisées pour l'élaboration du catalogue.....	- 69 -
Tableau V.6 : Bornes supérieures des classe de trafic cumulé (en millions d'essieux équivalents NE).....	- 69 -
Tableau V.7 : Modules de calcul descriptifs de la plateforme support de chaussée.....	- 70 -

Tableau V.8 : Caractéristiques mécaniques des matériaux non traités - 71 -

Tableau V.9 : Caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux - 71 -

Tableau V.10 : Caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques - 72 -

Tableau V.11 : Type et épaisseur de la couche de roulement selon le trafic - 72 -

Tableau V.12 : Épaisseurs minimales et maximales de mise en oeuvre - 73 -

Tableau V.13 : Scénarii de structures pour chaussées souples - 74 -

Tableau V.14 : Scénarii de structures pour chaussées semi-rigides - 75 -

Tableau V.15 : Scénarii de structures pour chaussées à structures mixtes - 75 -

LISTES DES TABLEAUX DES ANNEXES

Tableau A0.1 : Caractérisation des sols de plateforme.....	0
Tableau A0.2 : Contraintes et déformations admissibles pour les sols de plateforme.....	0
Tableau A1.1 : Spécifications sur les sables naturels [9].....	1
Tableau A1.2 : Domaine d'utilisation des graves naturelles.....	1
Tableau A1.3 : Contraintes et déformations admissibles pour les sables naturels.....	1
Tableau A2.1 : Spécifications sur les graves naturelles [9].....	2
Tableau A2.2 : Fuseaux granulaires pour les graves naturelles [9].....	2
Tableau A2.3 : Domaine d'utilisation des graves naturelles.....	2
Tableau A2.4 : Contraintes et déformations admissibles pour les graves naturelles.....	2
Tableau A3.1 : Valeurs minimales de ES, LA et MDE pour les GNT et GRH [5].....	3
Tableau A3.2 : Fuseaux granulaires pour les GNT/GRH [9].....	3
Tableau A3.3 : Domaine d'emploi des GNT/GRH.....	3
Tableau A3.4 : Contraintes et déformations admissibles pour les GNT.....	3
Tableau A3.5 : Contraintes et déformations admissibles pour les GRH.....	3
Tableau A4.1 : Spécifications sur les graveleux latéritiques crus [9].....	4
Tableau A4.2 : Fuseaux granulaires pour les graveleux latéritiques crus après compactage (CEBTP) [9].....	4
Tableau A4.3 : Domaine d'emploi des graveleux latéritiques crus.....	4
Tableau A4.4 : Contraintes et déformations admissibles pour les graveleux latéritiques crus.....	4
Tableau A5.1 : Spécifications sur les graveleux latéritiques améliorés aux concassés [9].....	5
Tableau A5.2 : Fuseaux granulaires pour les graveleux latéritiques améliorés aux concassés [9].....	5
Tableau A5.3 : Domaine d'utilisation des graveleux latéritiques améliorés aux concassés.....	5
Tableau A5.4 : Contraintes et déformations admissibles pour les graveleux latéritiques améliorés aux concassés.....	5
Tableau A6.1 : Dosages en liants moyens admissibles [5].....	6
Tableau A6.2 : Caractéristiques des granulats pour assises traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques [5].....	6
Tableau A6.3 : Performances à un an des graves traitées [5].....	6
Tableau A6.4 : Fuseaux granulaires pour les graves-ciment [3].....	6
(Assises de chaussées Jeuffroy et Sauterey – Presses ENPC).....	6
Tableau A6.5 : Ordre de grandeur des épaisseurs pour assises traitées aux liants hydrauliques [3].....	6
Tableau A6.6 : Domaine d'utilisation des graves traitées au ciment.....	6
Tableau A7.1 : Valeurs de ks.....	7
Tableau A7.2 : Contraintes et déformations admissibles pour les graves-ciment.....	7
Tableau A8.1 : Spécifications sur la latérite crue utilisée [9].....	8
Tableau A8.2 : Spécifications sur le mélange des graveleux latéritiques traités au ciment.....	8
Tableau A8.3 : Domaine d'utilisation des graveleux latéritiques traités au ciment.....	8
Tableau A8.4 : Valeurs de ks.....	8
Tableau A8.5 : Contraintes et déformations admissibles pour les graveleux latéritiques traités au ciment.....	8
Tableau A9.1 : Spécifications sur les sables traitables au ciments [9].....	9
Tableau A9.2 : Spécifications sur le mélange sol-ciment [9].....	9
Tableau A9.3 : Classification mécanique des sables traités aux liants hydrauliques [5].....	9
Tableau A9.4 : Domaine d'utilisation des sables traités au ciment.....	9
Tableau A9.5 : Valeurs de ks.....	9

Tableau A9.6 : Contraintes et déformations admissibles pour les sables traités au ciment.....	9
Tableau A10.1 : Spécifications sur les granulats pour graves-bitume et graves-émulsion [9].....	10
Tableau A10.2 : Graves pour graves-bitume et graves-émulsion : angularité, indice de concassage [5].....	10
Tableau A10.3 : Fuseaux granulaires pour les graves-bitume 0/31.5 (CEBTP) [9].....	10
Tableau A10.4 : Dureté des graves pour graves-bitume et graves-émulsion : coefficient de Los Angeles [5].....	10
Tableau A10.5 : Performances des graves-bitume dans l'essai d'immersion compression LCPC à 18°C [5].....	10
Tableau A10.6 : Performances des graves-émulsion dans l'essai d'immersion-compression LCPC à 18°C [5].....	10
Tableau A10.7 : Domaine d'utilisation des graves-bitume.....	10
Tableau A11.1 : Valeurs de ks.....	11
Tableau A11.2 : Contraintes et déformations admissibles pour les graves-émulsion et graves-bitume.....	11
Tableau A12.1 : Spécifications sur les sables traitables au bitume [9].....	12
Tableau A12.2 : Performances sur les mélanges de sables-bitume [9].....	12
Tableau A12.3 : Classification des sables-bitume dans l'essai d'immersion compression LCPC à 18°C [7].....	12
Tableau A12.4 : Domaine d'emploi des sables-bitume.....	12
Tableau A13.1 : Caractéristiques des granulats pour enduits superficiels [5].....	13
Tableau A13.2 : Choix du type de liants en fonction du trafic pour enduits superficiels.....	13
Tableau A13.3 : Dosage en gravillons et en liants pour enduits superficiels [5].....	13
Tableau A13.4 : Domaine d'emploi des enduit superficiels.....	13
Tableau A14.1 : Spécifications sur les granulats pour bétons bitumineux [9].....	14
Tableau A14.2 : Fuseaux granulométriques pour bétons bitumineux [9].....	14
Tableau A14.3 : Spécifications sur le mélange des bétons bitumineux [5].....	14
Tableau A14.4 : Domaine d'emploi des bétons bitumineux.....	14
Tableau A15.5 : Valeurs de ks.....	15
Tableau A15.6 : Contraintes et déformations admissibles pour les bétons bitumineux.....	15
Tableau A16.1 : Spécifications sur les granulats pour enrobés denses [9].....	16
Tableau A16.2 : Fuseaux granulométriques pour enrobés denses [9].....	16
Tableau A16.3 : Spécifications sur le mélange des enrobés denses [9].....	16
Tableau A16.3 : Domaine d'utilisation des enrobés denses.....	16
Tableau A16.4 : Valeurs de ks.....	16
Tableau A16.5 : Contraintes et déformations admissibles pour les enrobés denses.....	16
Tableau A17.1 : Spécifications sur les granulats pour enrobés denses [9].....	17
Tableau A17.2 : Fuseaux granulométriques CEBTP pour sand-asphalt [9].....	17
Tableau A17.2 : Spécifications sur le mélange des sand-asphalt [9].....	17
Tableau A17.3 : Domaine d'utilisation des sand-asphalt.....	17

LISTES DES ABBREVIATIONS ET NOTATIONS

ORGANISMES ROUTIERS

AATR	Agence Autonome des Travaux routiers
AASHO	American Association of State Highways Officials
CEBTP	Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics
CEREEQ	Centre Expérimental de Recherches et d'Études pour l'Équipement
ESP	École Supérieure Polytechnique
GIC	Groupement d'Ingénierie et de Construction
LCPC	Laboratoire central des Ponts et Chaussées
RRL	Road Research Laboratory
SETRA	Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes
TRRL	Transport and Road Research Laboratory

MATÉRIAUX

BB	Béton bitumineux	GRH	Grave reconstituée humide
COQ	Banco-coquillage	LAC	Graveleux latéritiques traités au ciment
COQC	Banco-coquillage traité au ciment	LACo	Graveleux latéritiques améliorés aux concassés
ED	Enrobés denses	LAT	Graveleux latéritiques crus
ES	Enduit superficiel	SA	Sand asphalt
GB	Grave-bitume	SB	Sable-bitume
GC	Grave-ciment	SC	Sable-ciment
GN	Grave naturelle	SN	Sable naturel
GNT	Grave non traitée		

PARAMÈTRES DE DIMENSIONNEMENT

b	pende de fatigue du matériau exprimée sous forme d'une loi bi-logarithmique
c	coefficient associant la variation de déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée Δh (m ⁻¹)
E	module d'Young (MPa)
E(θ, f)	module d'Young à la température θ et à la fréquence f (MPa)
f	fréquence (Hz)
k_c	coefficient de calage

k_d	coefficient tenant compte des discontinuités des structures de chaussées rigides
k_r	coefficient ajustant la valeur de déformation ou de contrainte admissible en fonction du risque de calcul ou des facteurs de dispersion
k_a	coefficient de prise en compte des hétérogénéités locales de la portance de la couche non liée sous-jacente
K	rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale (pour les structures mixtes)
p	période de calcul
Sh	écart-type sur l'épaisseur de la couche mise en œuvre (m)
SN	écart-type sur le logarithme du nombre de cycles entraînant la rupture par fatigue
u	variable aléatoire de la loi normale centrée réduite associée au risque r
β	pente de fatigue du matériau exprimée sous forme d'une loi semi-logarithmique
δ	écart-type combinant la dispersion sur les épaisseurs et celle sur les résultats d'essais en fatigue
$\varepsilon_{t,ad}$	déformation horizontale admissible en traction
$\varepsilon_{z,ad}$	déformation verticale admissible en compression
ε_t	déformation en traction/compression maximale dans le plan horizontale
ε_z	déformation verticale maximale
ε_s	déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de 10^6 cycles avec une probabilité de 50 %, à 10°C et 25Hz
$\varepsilon_s(\theta, f)$	déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de 10^6 cycles avec une probabilité de 50 %, à la température $\theta^\circ\text{C}$ et pour une fréquence f
$\varepsilon(N, \theta, f)$	déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexions sur éprouvette est obtenue au bout de N cycles avec une probabilité de 50 %, à la température $\theta^\circ\text{C}$ et pour une fréquence f
ν	coefficient de Poisson
$\nu(\theta, f)$	coefficient de Poisson à la température $\theta^\circ\text{C}$ et pour une fréquence f
θ	température de calcul ($^\circ\text{C}$)
θ_{eq}	température équivalente ($^\circ\text{C}$)
$\sigma_{t,ad}$	contrainte admissible en traction à la base d'une couche (MPa)
σ_t	contrainte en traction/compression maximale dans le plan horizontal (MPa)
σ_s	contrainte pour laquelle la rupture par traction en flexion sur éprouvette de 360 j est obtenue pour 10^6 cycles (MPa)
$\sigma_t(N)$	contrainte pour laquelle la rupture par traction en flexion sur éprouvette de 360 j est obtenue pour N cycles (MPa)

ESSAIS ET GRANDEURS

A	coefficient d'aplatissement
CBR	indice de portance californien (Californian Bearing Ratio) (%)
CPA	coefficient de polissage accéléré
d	diamètre des plus petits éléments du matériaux
D	diamètre des plus gros éléments du matériaux
ES	équivalent de sable
EV2	module à la plaque au second cycle de chargement

I_c	indice de concassage
I_p	indice de plasticité (%)
IPI	indice de portance immédiate (%)
LA	coefficient de Los Angeles (%)
MDE	coefficient micro-Deval en présence d'eau (%)
OPM	optimum Proctor modifié
r	résistance à la compression simple après immersion à l'essai Duriez (MPa)
R	résistance à la compression simple avant immersion à l'essai Duriez (MPa)
R_t	résistance à la traction directe (MPa)
w	teneur en eau (%)
ρ	masse volumique (kg/m ³)

TRAFIC

CAM	coefficient d'agressivité moyenne
N	nombre cumulé de véhicules sur la période calcul
NE	nombre équivalent d'essieux de référence correspondant aux trafic poids lourds
MJA	moyenne journalière annuelle
PL	poids lourds
t	taux annuel de croissance géométrique du trafic (%)
Ti	classe de trafic
TCi	classe de trafic cumulé

SOL-SUPPORT

ARI	classe de portance à long terme de l'arase de plateforme
PFi	classe i de portance à long terme de la plate-forme support de chaussée
PST	partie supérieure des terrassements
Si	classe de plate-forme CEBTP

INTRODUCTION GENERALE

Les catalogues de structures peuvent être considérés comme des méthodes de dimensionnement très faciles d'utilisation puisque permettant à partir de quelques « inputs » de choisir une structure de chaussée adaptée. Le premier catalogue français a été publié en 1971 ; il a été actualisé en 1988 avant d'être révisé en 1998. La Côte d'Ivoire voisine a produit son premier catalogue en 1977. Ces deux exemples nous conduisent à dire que le Sénégal, qui ne dispose toujours pas de cet outil, est en retard et qu'il urge pour l'administration routière de mettre en œuvre le catalogue national. Ce projet devra être mené en y associant les bureaux d'études, les entreprises, les laboratoires locaux et les instituts de recherche.

Dans le souci de pallier cette insuffisance, l'ESP Thiès, en partenariat avec l'entreprise Jean Lefebvre Sénégal, avait déjà initié, dans le cadre des projets de fin d'études, la confection d'un catalogue des structures types de chaussées neuves au Sénégal. Mr. Ousmane MBODJI a produit un mémoire intitulé « Esquisse d'un catalogue de dimensionnement des chaussées pour le Sénégal » en 2003. Ce travail avait défini l'orientation, le modèle que devrait avoir le catalogue mais n'avait pu aboutir à la production des fiches de structures. Par la suite, les élèves ingénieurs Ibrahima CISSOKHO et Serigne Modou GUEYE continueront ce travail dans leur mémoire intitulé « Élaboration d'un catalogue de dimensionnement des chaussées souples pour la zone ouest du Sénégal ». Comme indiqué par le titre du mémoire, l'étude a été effectuée sur des matériaux spécifiques à la zone ouest et a permis de produire des fiches de matériaux.

Il restait donc à produire un catalogue contenant des fiches de structures intégrant les caractéristiques de trafic, géotechniques, climatiques et économiques sur l'ensemble du territoire sénégalais. A cela, s'ajoutait la nécessité de remettre à jour quelques paramètres de dimensionnement (configuration du trafic, module d'Young et caractéristiques en fatigue de certains matériaux...).

Cette présente étude vise donc à produire un catalogue des structures types de chaussées neuves comprenant des fiches de matériaux définissant les spécifications auxquelles devront répondre les matériaux routiers et des fiches de structures intégrant les multiples scénarii de structures techniquement réalisables et économiquement rentables. Ce catalogue devra ainsi alléger le travail du projeteur par la mise à sa disposition d'un ensemble de solutions techniques prédéfinies et comparables.

Par une recherche bibliographique assez élargie, nous avons essayé de collecter l'ensemble des informations relatives aux caractéristiques du réseau routier sénégalais (TMJA, coefficient d'agressivité moyenne), à celles des matériaux utilisables en construction routière ainsi qu'aux principes de base de la méthode rationnelle de dimensionnement employée. Cette phase préliminaire nous permettra, par la suite, de calculer les contraintes et déformations admissibles des matériaux et de les comparer aux valeurs réelles calculées, pour chaque scénario de structure, à l'aide du logiciel ALIZE III.

Cinq chapitres composent le mémoire : le premier décrit les caractéristiques du réseau routier national ainsi que les généralités sur les routes. Le second et le troisième répertorient respectivement les matériaux routiers et les méthodes de dimensionnement utilisés au Sénégal. Nous exposerons dans le chapitre suivant, de manière détaillée, la méthode française de dimensionnement des chaussées avant de décliner dans le cinquième chapitre les hypothèses de calcul pour l'élaboration du catalogue sénégalais. En annexe, seront consignées les fiches matériaux ainsi que les fiches de structures du catalogue.

I. GENERALITES SUR LES ROUTES

I.1. Présentation sommaire du réseau routier sénégalais

I.1.1. Le réseau classé

La loi n° 74-20 du 24 janvier 1974 et son décret d'application n°74-718 classifient le réseau routier national en :

- routes nationales ;
- routes régionales ;
- routes départementales ;
- pistes répertoriées ;
- voiries urbaines ;
- et réseau non classé.

L'arrêté interministériel n° 15087 du 14 décembre 1985 et son additif n° 005201 du 11 avril 1987 définissent les voies du réseau classé. L'inventaire du réseau routier, actualisé en 2005, fait état d'un linéaire total classé de 14 805 km dont 4 805 km de routes revêtues soit 32.5 % du total et 10 000 km de routes non revêtues soit 67.5 % du total.

Catégories de routes	Réseau total	Routes revêtues		Routes non revêtues	
	(km)	(km)	%	(km)	%
Routes Nationales	3 364	2 857	85 %	507	15 %
Routes régionales	1 192	563	47 %	629	53 %
Routes départementales	5 640	813	14 %	4 827	86 %
Voiries urbaines	247	241	98 %	6	2 %
Pistes répertoriées	4 191	85	2 %	4 106	98 %
Total	14 634	4 559	31 %	10 075	69 %

Tableau I.1 – Inventaire du réseau routier classé en 2002 [18]

Selon le rapport final du Programme Triennal de Transport (PTT) 2003/2005, la densité moyenne du réseau routier qui est de 7.4 km/100 km² est très inégalement répartie sur le territoire. La densité la plus élevée se trouve dans la région de Dakar, où elle est de 55.5 km/100 km² et la plus faible 4.7 km/100 km² se retrouve dans la région de Saint-Louis.

I.1.2. Caractéristiques générales du réseau

En général, les chaussées du réseau revêtu sont caractérisées comme suit :

- une plate-forme de 7 à 10.5 m de largeur ;
- une couche de fondation réalisée en latérite crue ;
- une couche de base en latérite-ciment et quelquefois en latérite crue ;
- un revêtement en enduit superficiel mais pour les routes à trafic intense il peut être en béton bitumineux ou en sand-asphalt dans certains cas.

Les routes non revêtues quant à elles comprennent principalement trois catégories :

- **les routes en terre modernes (RTM)**, praticables en toutes saisons grâce à une mise hors d'eau obtenue par un assainissement performant ;
- **les routes en terre sommaires (RTS)** dont la qualité de l'assainissement ne permet pas une mise hors d'eau, ni une viabilité permanente ;
- **les pistes** qui, à la différence des deux premières, ne comportent pas de structures de chaussée (pas de plate-forme, ni de couche de roulement). Elles sont tracées directement sur le terrain naturel et comprennent très rarement des ouvrages d'art.

I.1.3. État du réseau classé

Les inspections menées dans le cadre de l'élaboration du Plan Triennal de Transport 2007/2009 ont montré que :

- 54.7 % (contre 59% en 2002) des routes revêtues et 27.2 %(contre 18 % en 2002) des routes non revêtues étaient dans un état bon ou moyen ;
- 45.3 % (contre 41 % en 2002) des routes revêtues et 72.8 % (contre 82 % en 2002) des routes non revêtues étaient dans un état mauvais.

I.1.4. Trafic

La campagne nationale de comptage routier effectuée en 2002 a donné les résultats suivants :

- les débits journaliers moyens les plus élevés se rencontrent dans la région ouest du Sénégal (Dakar et Thiès) : l'essentiel de la population et des activités économiques y étant concentrées ;
- la croissance générale du trafic journalier moyen est de 6.3 % entre 1996 et 2002 soit un accroissement annuel moyen de 1.02 % ;
- sur la majorité du réseau, le trafic est inférieur à 500 véh/j : on ne rencontre un trafic supérieur à 2000 véh/j que sur 10.9 % du réseau étudié, soit 3 % du réseau classé national.

Région	Trafic (en véh/j)		Variation
	1996	2002	
Dakar	7 484	7 028	-4,6 %
Diourbel	1 301	1 470	13 %
Fatick	451	438	-2,9 %
Kaolack	960	1 045	8,9 %
Kolda	215	234	8,6 %
Louga	451	492	9,2 %
Saint-Louis	609	597	-1,9 %
Tambacounda	308	353	14,7 %
Thies	3 270	3 548	8,5 %
Ziguinchor	353	325	-8 %
<i>Moyenne nationale</i>	<i>851</i>	<i>905</i>	<i>6,3 %</i>

Tableau 1.2 – Évolution du trafic entre 1996 et 2002 [17]

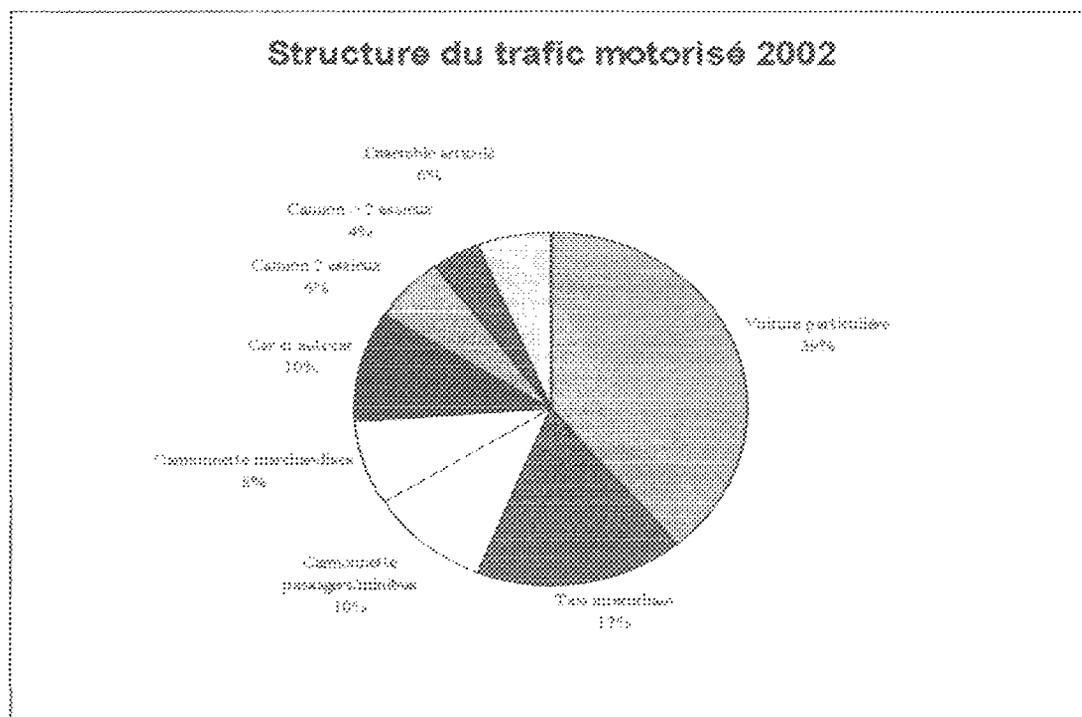


Figure 1.1 – Structure du trafic motorisé en 2002 [17]

1.2. Description matérielle d'une chaussée

Une chaussée est une succession de couches de matériaux mises en œuvre sur un support appelé *sol support* ou *sol de plate-forme*. Ce dernier, pour des besoins de traficabilité lors de la réalisation (passages des engins lourds) ou d'homogénéisation et de protection, peut être surmonté d'une *couche de forme*. Le corps de la chaussée est constitué de l'*assise* comprenant successivement la *couche de fondation* (qui peut être éventuelle) et la *couche de base* surmontée

de la *couche de surface* comprenant une *couche de liaison* (éventuellement) et une *couche de roulement* recevant directement les sollicitations du trafic. Pour mieux assurer la durabilité de la chaussée, d'autres couches non moins importantes peuvent être réalisées : il s'agit de la sous-couche « drainante » et anticapillaire, ou de la sous-couche anti-contaminante... Une description plus détaillée de chacune de ces couches sera faite dans la suite de ce chapitre.

Pour assurer une meilleure protection et une sécurité à la route, des aménagements supplémentaires sont nécessaires. On distingue ainsi :

- *l'accotement* : il s'étend de la limite de la chaussée à celle de la plate-forme et est composé de la bande dérasée et de la berme. La *bande dérasée* encore appelée bande d'arrêt d'urgence est une zone dégagée de tout obstacle permettant de récupérer les véhicules déviant de leur trajectoire et le stationnement de ceux-ci en urgence. Elle facilite aussi les travaux d'entretien de la route et de ses dépendances. La *berme*, qui est non « roulable », assure la liaison entre les couches stabilisées de la chaussée et les talus ou cunettes :

- *les talus* : ils constituent la partie en pente aux extrémités d'un profil en travers en remblai ou en déblai ;

- *la cunette* : encore appelée fossé, est située en bas de talus et est chargée de la collecte des eaux de drainage issues de la chaussée, des accotements et du talus.

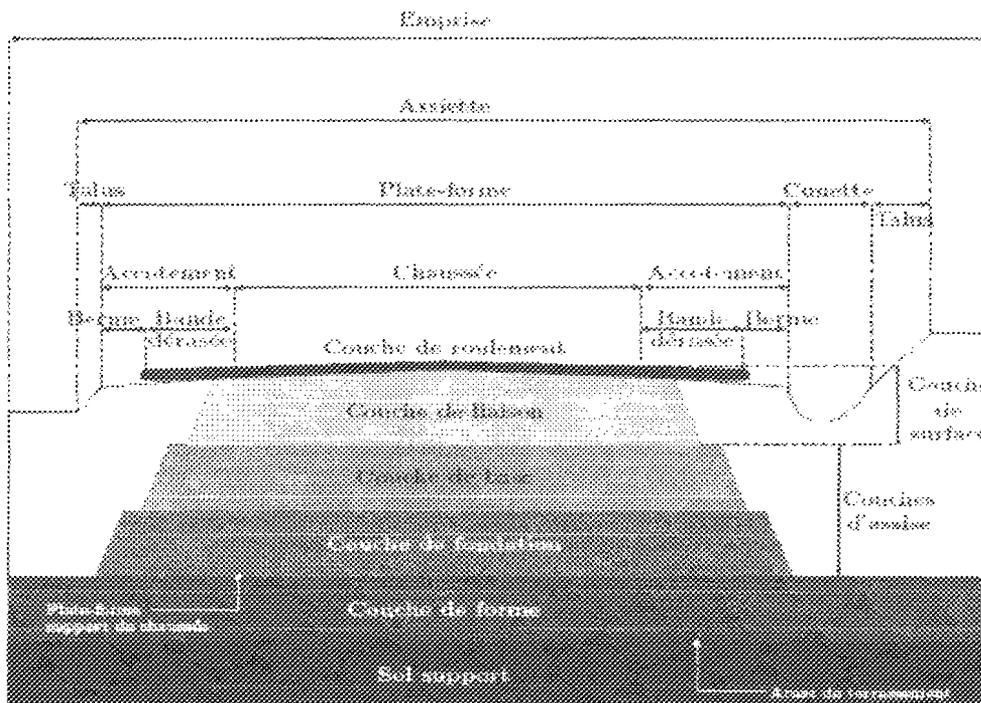


Figure 12: Coupe transversale d'une chaussée [7]

I.3. Types de structures de chaussées utilisées au Sénégal

Selon la nomenclature française, il existe six catégories de chaussées suivant la constitution de l'assise :

- *les chaussées souples* dont les matériaux ne sont pas traités ;
- *les chaussées semi-rigides* dont les matériaux sont traités aux liants hydrauliques;
- *les chaussées rigides* réalisées en béton de ciment;
- *les chaussées bitumineuses épaisses* dont les matériaux sont traités aux liants hydrocarbonés ;
- *les chaussées à structure mixte* alliant une couche traitée aux liants hydrauliques et une autre traitée aux liants hydrocarbonés;
- *les chaussées à structure inverse* comportant une couche de fondation traitée aux liants hydrauliques, surmontée d'une couche non traitée et une couche de base traitée aux liants hydrocarbonés. Cependant pour l'adapter au contexte économique sénégalais, la couche d'assise traitée aux liants hydrocarbonés pourrait ne pas exister.

Le contexte économique et la pratique routière du Sénégal font qu'on n'y rencontre majoritairement que deux des structures précitées : les chaussées souples ou flexibles et les chaussées semi-rigides. Nous signalerons quand même l'existence de quelques chaussées à structure mixte : c'est le cas de la nouvelle autoroute Dakar-Diamniadio. Les chaussées rigides sont essentiellement réalisées sur de petits tronçons dans la voirie urbaine.

I.3.1. Les chaussées souples

Les chaussées souples encore appelées chaussées flexibles tiennent leur nom du fait qu'elles ont l'aptitude de se déformer réversiblement sous les sollicitations. Ainsi, au passage d'une charge lourde, les chaussées souples se déforment de 1 à 3 mm (contre 0 à 0.5 mm pour une chaussée rigide à assise traitée). Si la structure est adaptée, sol et chaussée retrouvent leur position initiale. Par contre si elle n'est pas adaptée (charges trop lourdes et répétitives), les déformations deviennent irréversibles, entraînant ainsi une dégradation rapide de la structure. Ce type de chaussée est donc plus adapté pour les voies très peu circulées par les poids lourds. Les chaussées flexibles sont sans doute les plus rencontrées au Sénégal et comportent :

- une couverture bitumineuse relativement mince ;
- une couche de base en matériaux non traités (ou en matériaux bitumineux dans des cas) ;
- une couche de fondation en matériaux non traités.

La chaussée souple distribue les efforts de surface à travers les couches de base et de fondation de manière à les ramener à un taux compatible à celui du sol de plate-forme. Plus la chaussée est épaisse moins la déformation à la base de la plate-forme est importante. Leur dimensionnement repose sur la limitation de la déformation verticale e_z du sol support et l'épaisseur globale est généralement comprise entre 30 et 60 cm

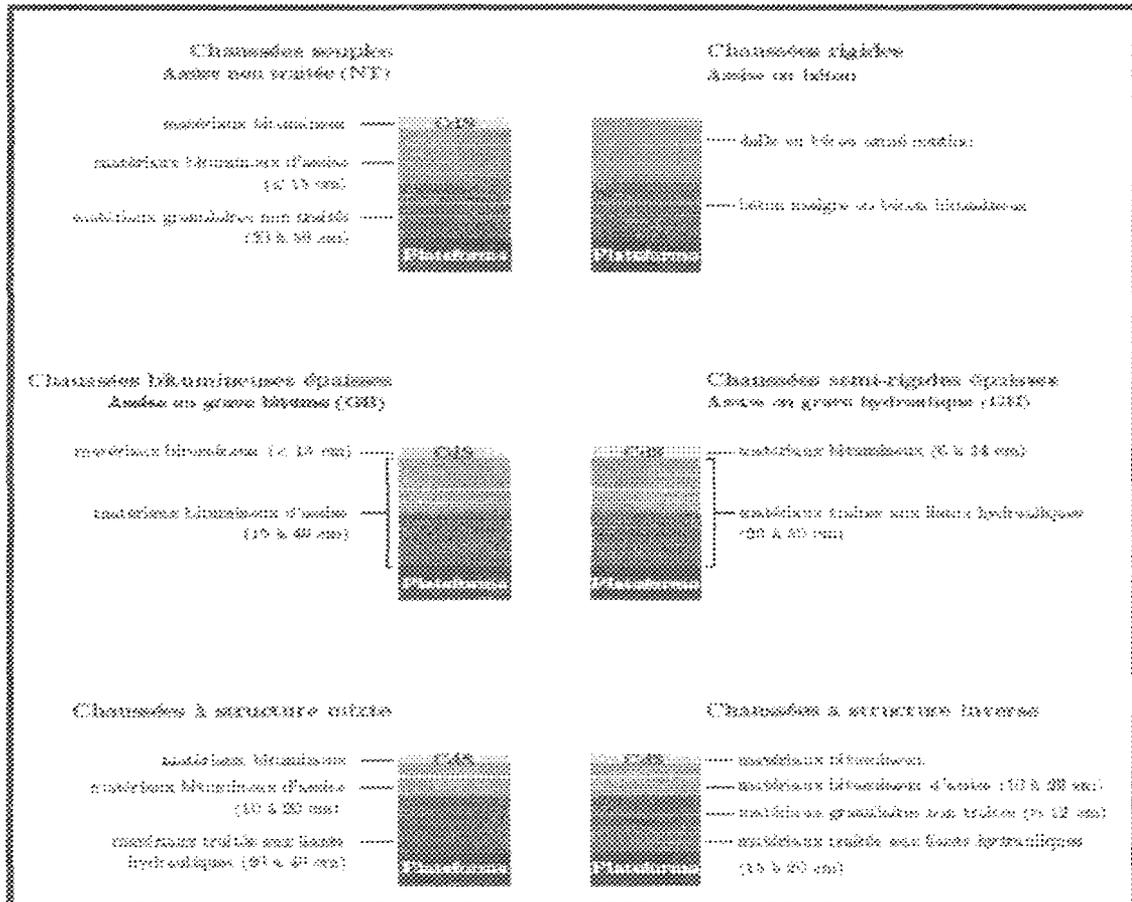


Figure 13: Familles de structures de chaussée [1]

1.3.2. Les chaussées semi-rigides

Encore appelées chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, elles sont utilisées lorsque les trafics deviennent importants et que les matériaux crus ne satisfont pas aux exigences mécaniques. Le liant augmentant la rigidité de l'assise, les déformations verticales sont relativement faibles et le dimensionnement de la chaussée porte essentiellement sur la limitation de la contrainte de traction par flexion à la base des couches traitées. Les chaussées semi-rigides sont constituées :

- d'un revêtement bitumineux relativement mince ;
- d'une couche de base traitée ;
- d'une couche de fondation traitée ou non traitée ;

L'épaisseur d'une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques varie généralement entre 20 et 50 cm.

I.3.3. Les chaussées rigides

Ce sont des structures comportant une dalle en béton de ciment continue (béton armé continu) ou discontinue (avec ou sans éléments de liaison aux joints) de 15 à 40 cm reposant sur une fondation pouvant être réalisée avec des matériaux traités aux liants hydrauliques, du béton de ciment ou tout simplement en matériaux non traités drainants. La dalle de béton peut aussi reposer directement sur le sol-support mais il faut, dans ce cas, intercaler une couche bitumineuse. Généralement, pour assurer un meilleur confort aux usagers, un revêtement bitumineux de faible épaisseur est disposé sur la dalle de béton.

Pour des trafics élevés, les chaussées rigides ont des performances mécaniques très intéressantes, comparées aux autres types de structures. De plus, leur durée de vie est beaucoup élevée ; seulement l'investissement initial est plus lourd.

I.3.4. Les chaussées à structure mixte

D'un emploi très peu fréquent au Sénégal, cette famille de chaussée se structure de la manière suivante :

- un revêtement bitumineux ;
- une couche de base en grave bitume d'épaisseur variant entre 10 et 20cm ;
- une couche de fondation en grave traitée aux liants hydrauliques d'épaisseur variant entre 20 et 40 cm.

Un paramètre permettant de caractériser les structures mixtes est le rapport de l'épaisseur de « noir » à l'épaisseur totale, rapport qui est généralement pris égal à 0.5. Il arrive aussi que les chaussées disposant de plusieurs couches d'enrobés reposant sur une assise traitée aux liants hydrauliques, soient considérées dans la famille des structures mixtes, du fait de l'importance de l'épaisseur du revêtement bitumineux (cas des chaussées renforcées).

I.4. Description fonctionnelle des couches de la chaussée

Les chaussées sont des structures multicouches où chacune des couches est, dans la plupart des cas, composée d'un matériau différent. Il en résulte que les fonctions qui sont attribuées à chaque couche diffèrent selon que l'on parle des couches d'assise, de la couche de surface ou de la plate-forme.

I.4.1. La plate-forme

Les chaussées reposent sur une ou plusieurs couches dont la partie supérieure est appelée plate-forme support de chaussée. Cet ensemble de couches est constitué :

- d'un sol support, pouvant être en remblai ou en déblai, désigné dans sa partie supérieure (1m d'épaisseur) par le terme de « partie supérieure des terrassements » (PST) et dont la surface constitue l'arase de terrassement notée AR ;
- d'une couche de forme éventuelle.

Le plate-forme doit satisfaire à des exigences prenant en compte d'une part des critères à court terme et d'autre part à long terme.

A court terme, la plate-forme doit être en mesure d'assurer :

- un niveau de **traficabilité** satisfaisant pour assurer la circulation des engins de terrassement lors des travaux de construction ;
- un **nivellement** garantissant la régularité des épaisseurs de couches et l'uni de la chaussée finie ;
- une **résistance à la déformation** autorisant un bon compactage des différentes couches;
- une **protection** du sol vis-à-vis des intempéries.

Notons que les seuils admis dans le choix des matériaux de plate-forme dépendent de la taille des travaux, du matériel utilisé, des conditions d'exécution et des matériaux utilisés en fondation.

A long terme, la plateforme doit contribuer au fonctionnement mécanique d'ensemble de la chaussée par :

- une homogénéité de la portance du support pour la conception de chaussées d'épaisseur constante ;
- un maintien dans le temps, en dépit des fluctuations de l'état hydrique des sols supports sensibles, d'une portance minimale pouvant être estimée avec précision au stade du dimensionnement de la structure de la chaussée ;
- sa contribution au drainage de la chaussée.

Quand la PST n'est pas en mesure de satisfaire les conditions ci-dessus citées, la mise en œuvre d'une couche de forme s'avère nécessaire.

Selon le « Manuel de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux », il existe cinq classes de sol de plate-forme classés selon la valeur de leur indice CBR (Californian Bearing Ratio):

Classe	Valeurs de CBR	Type de sol
S1	$CBR \leq 5$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ argiles fines saturées ▪ sols tourbeux ▪ limons plastiques ▪ sols contenant des matières organiques
S2	$5 < CBR \leq 10$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ sables alluvionnaires argileux ou fins limoneux ▪ graves argileuses ou limoneuses ▪ sols marneux contenant moins de 35 % de fines
S3	$10 < CBR \leq 15$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ sables alluvionnaires propres avec moins de 5% de fines
S4	$15 < CBR \leq 30$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ graves argileuses ou limoneuses avec moins de 12% de fines
S5	$CBR > 30$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ sables et graves propres ▪ matériaux rocheux sains ▪ chaussées anciennes ▪ matériaux insensibles à l'eau

Tableau I.3 – Classe de plate-forme selon le CEBTP [10]

I.4.2. La sous-couche

Sa fonction est de constituer, dans certains cas, un écran entre les matériaux mis en œuvre dans les terrassements et ceux des couches de l'assise (la couche de fondation en général sauf si elle est inexistante). Il existe deux types de sous-couches :

- **la sous-couche anti-contaminante** qui doit empêcher la remontée d'un matériau de plate-forme fin à travers les vides d'un matériau de fondation à structure ouverte. Elle doit avoir une granularité respectant à la règle des filtres vis-à-vis du sol à savoir :

$$D_{15} < 5 d_{85}$$

D_i : maille du tamis laissant passer i % des matériaux du sol de la sous-couche ;

d_j : maille du tamis laissant passer j % des matériaux du sol de forme.

- **la sous-couche drainante et anti-capillaire** qui doit d'une part, assurer le drainage efficace des couches de chaussée et d'autre part, empêcher la remontée capillaire au niveau de la forme des terrassements en présence d'une nappe phréatique ou dans les zones marécageuses. Cette sous-couche est généralement réalisée de sable grossier et de gravier mais d'autres matériaux sont utilisables (mâchefer, scories pouzzolaniques etc.). On peut aussi citer les

géotextiles qui sont de plus en plus utilisés comme matériaux de sous-couche et présentent par ailleurs des performances mécaniques intéressantes.

I.4.3. Les couches d'assise

L'assise est généralement composée de deux couches : la couche de base et la couche de fondation. Réalisée avec des matériaux à granulométrie continue (traitée ou non selon le trafic), elle contribue grandement à la résistance mécanique de la chaussée et à la diffusion des sollicitations verticales induites par le trafic.

I.4.3.1. La couche de fondation

Elle répartit les contraintes induites par le trafic à un taux compatible avec les limites admissibles du sol-support. A défaut d'être traitée aux liants hydrauliques, ce qui lui confère une certaine rigidité, la couche de fondation subit essentiellement des contraintes verticales de compression.

I.4.3.2. La couche de base

La couche de base est la couche d'assise la plus proche du revêtement. C'est pourquoi, elle reçoit des contraintes et des déformations notables (contraintes verticales de compression importantes et efforts de cisaillement d'autant plus importants que le revêtement est mince) qui font que les matériaux utilisés doivent présenter de meilleures performances mécaniques que ceux utilisés en couche de fondation. Si la couche de base est rigidifiée, il se produit un effet de dalle et des contraintes de traction importantes peuvent se développer à sa base.

I.4.4. La couche de surface

La couche de surface est constituée de :

- **la couche de roulement** encore appelée couche d'usure qui est la couche supérieure de la chaussée directement en contact avec les actions du trafic et du climat ;
- **la couche de liaison** qui est éventuelle et assure, si elle existe, la liaison entre la couche de roulement et l'assise.

La qualité d'une chaussée s'apprécie fortement par la nature et l'état de la couche de surface. Celle-ci doit donc satisfaire à certains objectifs :

- **la sécurité** : la couche de roulement doit posséder de très bonnes propriétés anti-dérapantes c'est-à-dire une bonne rugosité (microrugosité et macrorugosité) et une bonne drainabilité ;
- **le confort** : la chaussée doit présenter un uni satisfaisant pour réduire les secousses brutales ou vibrations excessives. Par ailleurs, la couche d'usure doit présenter de bonnes propriétés thermo-acoustiques ;
- **l'étanchéité** : pour que la chaussée atteigne la durée de vie escomptée, il est impératif que les couches sous-jacentes à la couche de roulement soient protégées des eaux de ruissellement. Cette couche doit donc par ses caractéristiques empêcher la pénétration des eaux. ;
- **la distribution des charges** : bien qu'elle ait parfois une épaisseur relativement faible, la couche de surface doit pouvoir transmettre les sollicitations des véhicules à l'assise, faute de quoi elle risque, elle-même, de connaître une dégradation prématurée.

Selon sa nature et son épaisseur, la couche de surface peut ou ne pas contribuer au rôle structurel de la chaussée.

I.5. Fonctionnement et endommagement des différents types de chaussées

La réponse mécanique aux sollicitations du trafic diffère suivant chaque famille de structures. En effet, la nature des matériaux utilisés en assise et la disposition des couches dictent essentiellement le comportement des chaussées. Cette partie a été développée en s'inspirant très largement du chapitre du même nom paru dans le « Guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussée » publié par le LCPC et le SETRA. Nous traiterons trois familles de structures : les structures souples, les structures semi-rigides et les structures mixtes.

I.5.1. Les chaussées souples

La faiblesse de la rigidité des matériaux non traités utilisés en assise et la minceur de la couverture bitumineuse font que les efforts verticaux induits par le trafic sont transmis au support avec une faible diffusion latérale. Les contraintes verticales élevées et répétitives engendrent des déformations plastiques de la plate-forme et de l'assise qui se répercutent en déformations permanentes en surface. Des efforts de traction-flexion sollicitent la couche de roulement à sa base.

Les chaussées souples sont très sensibles aux variations de l'état hydrique des sols supports. Cette sensibilité se traduit par l'apparition des « effets de bord » : réduction de portance

en période humide pouvant conduire à des affaissements de rive et fissurations de retrait hydrique en période de dessiccation.

L'endommagement des chaussées souples se manifeste généralement par l'apparition de déformations permanentes du type ornières à grand rayon, flaches et affaissements qui détériorent les qualités du profil en travers et du profil en long. Ces déformations croissent avec le trafic cumulé, en gravité et en étendue, selon la qualité de la structure et la dispersion des caractéristiques mécaniques du corps de chaussées et du sol. Les sollicitations répétées de flexion alternée sur la couverture bitumineuse entraînent une dégradation de fatigue sous la forme de fissures d'abord isolées puis évoluant peu à peu vers un faïençage à maille de faibles dimensions. L'infiltration hydrique étant plus facile, il apparaît des épaufrures aux lèvres des fissures avec départ de matériaux, puis des nids de poule. En l'absence d'entretien, la chaussée évolue très rapidement vers une destruction complète.

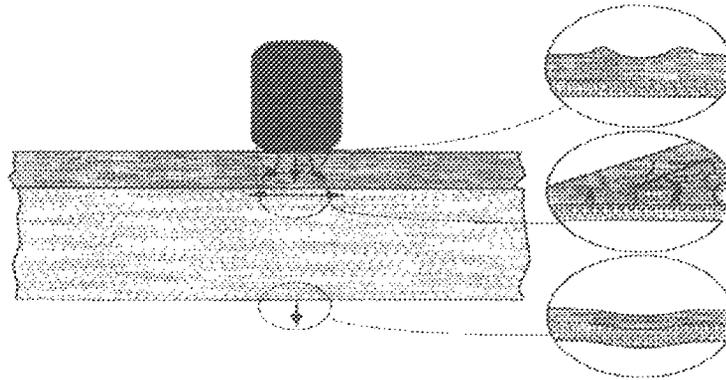


Figure 1.4 : Détérioration de la chaussée par l'action des charges lourdes [13]

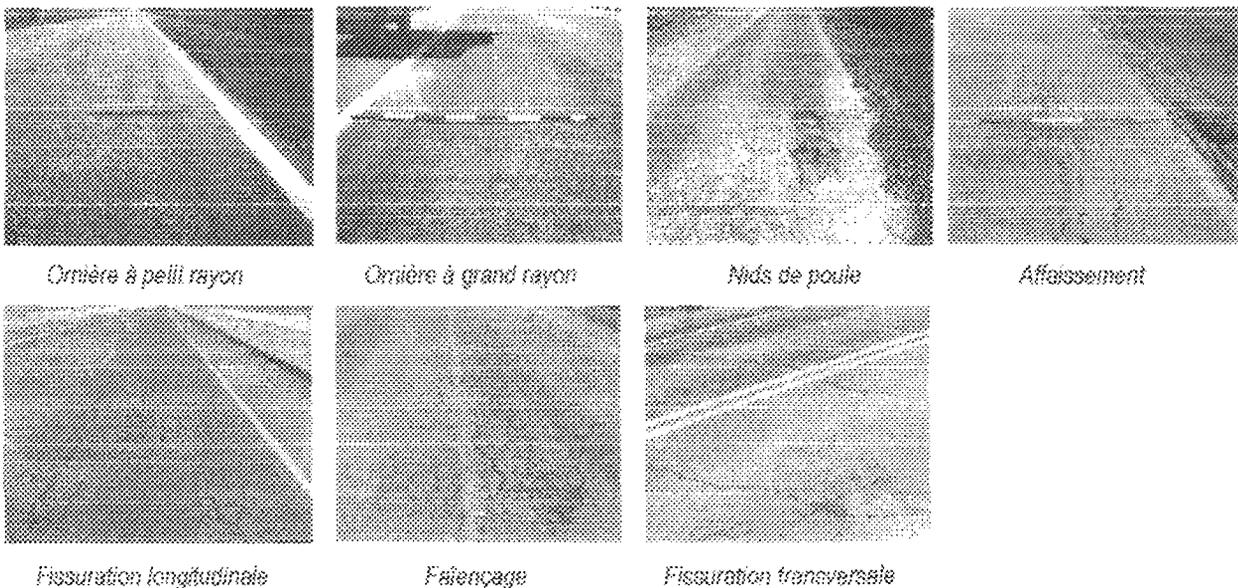


Figure 1.5 : Illustrations de quelques dégradations rencontrées sur les chaussées

I.5.2. Les chaussées semi-rigides

Du fait de la rigidité améliorée des matériaux traités aux liants hydrauliques, les contraintes verticales transmises au support de chaussée sont très faibles. Par contre, l'assise traitée subit des contraintes de traction-flexion qui constituent le critère fondamental de dimensionnement. Lorsque l'adhérence entre la couche de base et la couche de fondation assure une continuité des déplacements, la contrainte maximale de traction est observée à la base de la couche de fondation. Dans le cas contraire (où il se produit un glissement relatif), les couches travaillent toutes deux en traction à leur base. Il convient aussi de prendre en compte l'interface surface bitumineuse - couche de base qui est sensible car :

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

Les assises traitées aux liants hydrauliques sont sujettes au retrait thermique et au retrait de prise. Le retrait, empêché par le frottement de la couche d'assise sur son support, provoque des fissurations transversales qui, sans dispositions constructives, remontent à travers la couche de roulement. Elles apparaissent en surface avec des espacements réguliers variant de 5 à 15m et une ouverture variant avec la température entre quelques dixièmes de millimètres et quelques millimètres. Souvent franches lors de leur apparition en surface, les fissures de retrait tendent à se dédoubler et se ramifier sous l'effet du trafic.

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

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

Si la couverture bitumineuse est de faible épaisseur et perméable et si un soin suffisant n'est pas accordé à la surface de l'assise lors de sa réalisation (comme ce fut le cas pour les premières chaussées à assise traitée réalisées en France dès les années 60), la pénétration de l'eau est rendue facile et la surface de l'assise se dégrade très rapidement par attrition. Il apparaît ainsi, en période humide, des remontées de boues en surface pouvant évoluer vers des flaches avec des faïençages puis en nids de poule.

Des réalisations anciennes (en France), sous trafic modéré et dont l'interface roulement - base était de bonne qualité, ont montré que l'accroissement de la fissuration longitudinale dans les bandes de roulement conduisait, à terme, à la formation de petites dalles rectangulaires entre les fissures de retrait, avec localement les décalages par modification des conditions d'appui. Cela modifie sensiblement le mode de fonctionnement de la chaussée avec une assise formée d'éléments discontinus.

I.5.3. Les structures mixtes

Dans ce type de structure, la couche de fondation traitée aux liants hydrauliques, de par sa bonne raideur, atténue et dissipe les contraintes transmises au sol-support. Les couches bitumineuses assurent d'une part la qualité de l'uni de surface, et d'autre part elles empêchent la remontée des fissurations transversales de la couche de fondation traitée aux liants hydrauliques et réduisent les contraintes de flexion à la base de la fondation.

Tant que les différentes couches restent adhérentes, la couche bitumineuse est très faiblement sollicitée. Cependant, la combinaison de l'action du trafic et de la dilatation différentielle entre la grave-bitume et la couche traitée aux liants hydrauliques réduit considérablement l'adhérence entre les couches. Il naît ainsi des efforts de traction importants sur la grave-bitume qui peut rompre par fatigue.

Les structures mixtes sont aussi sensibles aux conditions environnementales : la couche traitée aux liants hydrauliques est sujette au retrait thermique et la couche bitumineuse connaît des fissuration sous les effets combinés des gradients thermiques journaliers et du trafic.

Les structures mixtes se comportent généralement bien, leur endommagement bien que rare peut se produire dans les cas suivants :

- l'utilisation de matériaux à fort coefficient de dilatation ce qui se traduit par des fissurations ;
- la présence d'un sol de mauvaise portance et l'insuffisance de la qualité et de l'épaisseur des graves aux liants hydrauliques qui se traduit par l'apparition de flaches de grandes dimensions pouvant aboutir à un faïençage des couches bitumineuses.

Conclusion

Nous avons au terme de ce chapitre, consacré aux généralités sur les routes, pu présenter le réseau routier classé sénégalais, décrire matériellement une chaussée et caractériser les rôles et le fonctionnement de ses différentes couches. Il est possible à partir de ces premiers éléments de

s'apercevoir à quel point il peut être difficile, aussi bien techniquement que financièrement, de concevoir, exploiter et entretenir un réseau routier. La culture technologique, les moyens financiers et la nature des matériaux différant d'un pays à un autre, est-il facile d'harmoniser les normes de conception. Les pays en développement comme le Sénégal se doivent donc de développer une vraie politique de recherche afin de maîtriser davantage les procédés de conception et de réalisation des chaussées. Cela devra d'abord passer par l'identification et la caractérisation des matériaux utilisables en construction routière, objet du chapitre suivant.

II. INVENTAIRE DES MATERIAUX ROUTIERS AU SENEGAL

La route est avant tout une succession de couches de matériaux devant supporter et répartir les charges des automobiles. La réussite d'un projet de construction routière est donc tributaire de la disponibilité qualitative et quantitative de zones d'emprunts. Qualitative parce que les matériaux doivent satisfaire à des spécifications techniques (bonne portance, bonne tenue à l'eau, résistance à l'attrition, bonnes propriétés de surface...). Quantitative parce que les projets routiers mobilisent des cubatures importantes de matériaux. Il paraît donc nécessaire pour l'administration routière d'identifier les matériaux exploitables dans l'étendue du pays pour mieux adapter la conception (choix de la structure et des matériaux) aux zones de projets.

Nous essaierons dans la suite du chapitre de lister les matériaux utilisés ou utilisables en construction routière, en donnant au passage quelques-unes des spécifications techniques conditionnant leur emploi. Des données plus détaillées sont contenues dans les fiches de matériaux en annexes.

Remarque : Quelques unes des spécifications seront empruntées à la documentation française. De ce fait, les classes de trafic les accompagnant devront subir une réadaptation par rapport aux classes définies pour l'étude ou celles en vigueur au Sénégal. Les plages d'équivalence entre ces différentes classes de trafic seront établies dans le chapitre V.

II.1. Les matériaux utilisés en assise de chaussée

II.1.1. Les matériaux non traités

II.1.1.1. Les sables naturels [cf. fiche de matériaux FM1]

Les sables sont des sols dont la dimension maximale exprimée en passoire est inférieure ou égale à 6.3mm, ayant un pourcentage de fines (passant au tamis de 80 μ m) inférieur à 35 %.

Les sables naturels, s'ils présentent une bonne cohésion, sont généralement utilisés en couche de fondation pour des trafics T1, T2 et exceptionnellement pour un trafic T3 lorsque la couche de base est granulaire. Une valeur minimale de CBR égale 30 est généralement requise pour l'utilisation des matériaux fins en couche de fondation.

Les sables argileux présentent une bonne aptitude au compactage et peuvent atteindre facilement une valeur de CBR de 30 si leur plasticité et leur granulométrie sont bonnes ($5 < I_p < 15$ et pourcentage de fines compris entre 10 et 20%).

Pour améliorer leurs performances mécaniques, les sables sont traités par :

- modification de la granulométrie suite à l'addition d'un concassé ;
- adjonction d'un liant hydraulique ;
- adjonction d'un liant hydrocarboné.

II.1.1.2. Les graves non traitées (GNT) [cf. FM2, FM3]

« Une grave non traitée est un mélange à granulométrie continue de cailloux, graviers et sable avec généralement une certaine proportion de particules fines. » [5]. Les graves non traitées sont caractérisées par :

- **la granularité** : elle est déterminée d'une part par la dimension de D et d'autre part par la courbe granulométrique. La dimension de D doit être limitée à 14 ou 20 mm (40 ou 60 mm dans certains cas) pour les couches de base et à 20 ou 31.5 mm (40 ou 60 mm dans certains cas) pour les couches de fondation. Une réduction de D réduit les risques de ségrégation et améliore l'uni de surface. La courbe granulométrique permet quant à elle de juger de l'aptitude au compactage (des valeurs de compacité minimales sont exigées pour les GNT) et d'apprécier la cohésion et la sensibilité de la grave aux variations hydriques (pourcentage de fines) ;
- **l'angularité et la forme des granulats** : elles concourent à la stabilité et la compacité des couches d'assises. Les granulats plats ou allongés réduisent la stabilité à la compacité, en plus les graves roulées ne conviennent qu'aux chaussées à faible trafic ;
- **la propreté** : elle est appréciée par l'essai d'équivalent de sable (ES) et est déterminante sur le comportement de la chaussée par temps humide.
- **la dureté** : elle caractérise la résistance à la fragmentation (déterminée par l'essai Los Angeles) et à l'attrition (déterminée par l'essai MicroDeval en présence d'eau).

On distinguera principalement deux grandes familles de graves non traitées :

- les graves non traitées de type A (GNT "A") et les graves naturelles (plus souvent appelées graves non latéritiques dans les zones tropicales et désertiques) provenant des gisements alluvionnaires qui comportent des granulats roulés ;
- les graves reconstituées humidifiées (GRH) ou graves non traitées de type B (GNT "B") obtenues par criblage, concassage et recomposition granulométrique en centrale. Elles présentent l'avantage d'être moins sujettes à la ségrégation et d'assurer un meilleur compactage.

II.1.1.3. Les matériaux locaux particuliers : cas des coquillages

On trouve sur le littoral sénégalais, sous une épaisseur très faible de sables de dune, des accumulations importantes de coquillages. Leurs dimensions sont inférieures à 40 mm avec un pourcentage d'éléments supérieurs à 2 mm compris entre 30 et 60 %. La densité sèche maximale correspondant à la teneur en eau maximale au Proctor Modifié (OPM), de l'ordre de 2.20, est élevée et les CBR sont excellents : 150 à la densité optimum et 70 à 95 % de l'optimum. Le coefficient de Deval est de l'ordre de 8 à 10, le pourcentage de vides élevé à l'état brut : 75 % est ramené à 25 % après cylindrage.

Un tronçon de la RN2 a été réalisé avec du banco-coquillage en couche de base (traité au ciment) lors des travaux de réhabilitation de la section Mékhé – St Louis en 1999.

Remarque : Nous n'avons pas pu disposer de suffisamment d'informations pour la production d'une fiche pour ce matériau.

II.1.2. Les graveleux latéritiques [cf. FM4, FM5, FM7]

Les latérites constituent, dans bon nombre de pays africains, le matériau routier le plus disponible et le plus utilisé.

« Les latérites peuvent être considérées comme des roches sédimentaires par le fait qu'elles résultent d'une accumulation et d'une cimentation de roches transportées ou existant sur place et qui sont des concrétions ou des grains de quartz. On peut aussi les considérer comme des roches métamorphiques en ce sens qu'elles résultent d'un processus d'altération de roches mères silico-alumineuses en climat tropical qui favorise le départ de la silice et bases solubles et l'enrichissement relatif en oxydes et hydrates non solubles tels que les hydroxydes de fer et d'alumine. » [16]

Un consensus n'étant pas trouvé entre pédologues et géologues sur la définition des latérites, elles peuvent être classées selon le rapport $\frac{\text{silice}}{\text{sesquioxydes de fer et d'aluminium}}$.

- si ce rapport est inférieur à 1.33, on parle de *latérites vraies* ;
- s'il est compris entre 1.33 et 2, on parle de *roches latéritiques* ;
- s'il est supérieur à 2, on parle de *minéraux non latéritiques* .

En général, pour leur utilisation comme matériaux d'assise, les latérites doivent avoir :

- un CBR ≥ 30 pour la couche de fondation (LAT1)
- un CBR ≥ 80 pour la couche de base (LAT2)

Dans les zones arides (cas du Sénégal), on retrouve des latérites ferrugineuses qui comportent fréquemment des concrétions bien indurées et un mortier relativement plastique. Leur CBR à 95 ou 98 % de l'OPM et 4 jours d'imbibition dépasse 80 et elles sont utilisables en couche de base.

Dans les zones de forêt dense caractérisées par une forte humidité (au Gabon et en Côte d'Ivoire par exemple), on retrouve des latérites ferralitiques qui contiennent peu de concrétions dures et sont plus plastiques. Les valeurs de l'indice CBR sont comprises entre 30 et 80.

Lorsqu'elles ne répondent pas aux exigences du trafic, les latérites crues peuvent subir un traitement soit par adjonction d'une frange granulaire 0/D ou d/D (grave latéritique améliorée au concassé) ou par ajout d'un liant hydraulique (chaux ou ciment).

II.1.3. Les matériaux traités aux liants hydrauliques

Lorsque le trafic devient important, les graves non traitées, les latérites crues et les sables naturels ne peuvent du fait de leur faible rigidité, répartir convenablement les charges au sol de plateforme. Le traitement par un liant hydraulique, selon sa proportion dans le mélange, permet d'élever la valeur du module d'Young E et de modifier du coup le comportement mécanique de ces matériaux qui auront tendance à développer des efforts de traction en flexion à leur base. Pour les latérites, on parlera généralement d'amélioration pour des dosages en liants inférieurs à 3 % et de stabilisation lorsqu'ils sont supérieurs à 3 %.

II.1.3.1. Les graves traitées aux liants hydrauliques [cf. FM6]

Pour ces matériaux, le développement de la prise est progressif et ils se comportent initialement comme des GNT. Les graves à traiter doivent donc présenter par leur granularité, leur angularité, leur forme, leur dureté et leur propreté des propriétés satisfaisantes.

Les graves déjà traitées sont caractérisées principalement à partir de :

- l'essai Proctor modifié ;
- et de l'essai de traction direct LCPC qui permet de déterminer, sur des éprouvettes conservées pendant 360 jours dans un étui étanche à une température de 20°C, la résistance en traction R_t et le module sécant E_t à 30 % de la charge de rupture. R_t et E_t permettent de déterminer l'indice de qualité élastique IQE qui est l'épaisseur de matériau qui, posé sous un massif semi-infini de module d'élasticité 100 MPa, se rompt après 10^6 chargements sous un essieu de 130 kN. Au Sénégal, l'essai « brésilien » par fendage plus simple est utilisé et il permet d'avoir une bonne approximation du résultat par traction directe.

II.1.3.2. Les sables traités aux liants hydrauliques [cf. FM8]

Les sables à traiter peuvent soit être des sables naturels, des sables de carrière ou des sables de ballastières. Les exigences fixées aux sables traités aux liants hydrauliques portent essentiellement sur :

- la stabilité immédiate appréciée par l'Indice de Portance Immédiate (IPI) qui varie généralement de 25 à 50. Elle assure une bonne traficabilité pendant la mise en œuvre (passage des engins de chantier) et permet de limiter la déformabilité sous trafic.
- les performances mécaniques à long terme appréciées par la résistance en traction directe à 90 ou 180 jours.

II.1.4. Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés

Ce sont des matériaux traités pour lesquels le liant est un bitume introduit, soit sous forme de bitume pur, soit sous forme d'émulsion lors de leur fabrication. Pour les matériaux utilisés en assise, on distingue principalement : les graves-bitume, les sables-bitume et les graves-émulsion.

II.1.4.1. Les graves-bitume [cf. FM9]

Elles sont définies par leur classe de granulats et la nature du liant utilisé. La dimension maximale des granulats doit respecter les conditions suivantes :

- couche de base : $14 \leq D \leq 20$
- couche de fondation : $14 \leq D \leq 31.5$

Il existe dans la pratique des fuseaux granulométriques normalisés pour les graves-bitume. Les granulats utilisables pour les graves-bitume sont aussi caractérisés par leur angularité définie par l'indice de concassage et leur dureté caractérisée par le coefficient de Los Angeles.

On utilise généralement un bitume 40/50 et la formulation est basée sur l'essai d'immersion-compression qui permet d'une part de mesurer la compacité et d'autre part de déterminer le rapport immersion-compression $\frac{r}{R}$ traduisant la tenue à l'eau de la grave-bitume.

R : résistance à la compression simple des éprouvettes conservées 7 jours à l'air à 18°C

r : résistance à la compression simple des éprouvettes conservées 7 jours dans l'eau à 18°C

La teneur en liant est définie en laboratoire pour plusieurs valeurs encadrant p :

$$p = \frac{2.65}{\rho} \times K^5 \times \sqrt{\Sigma}$$

2.65 (g/cm^3) : masse volumique moyenne des granulats naturels

K : module de richesse

Σ (m^2/kg) : surface spécifique des granulats

ρ (g/cm^3) : masse volumique des granulats

Les teneurs en liant varient entre 3.5 et 4.5% avec des minima imposés par la valeur du module de richesse K .

II.1.4.2. Les sables-bitume [cf. FM10]

La dimension maximale de D est inférieure à 6mm et on distingue généralement trois types de sables :

- sable 0/2 mm ;
- sable 0/4 mm ;
- sable 0/6 mm.

Le liant est un bitume 20/30 ou 40/50 dosé de 3 à 4 % pour assurer une bonne rigidité et la stabilité. Si la teneur en fines est inférieure à 5 %, il faut apporter une correction granulométrique au matériau par apport de fines (chaux, ciment, fines calcaires).

II.1.4.3. Les graves-émulsion [cf. FM9]

Le liant utilisé pour ces matériaux est une émulsion à rupture lente (la rupture devant se produire entre la sortie du malaxage et le compactage). Les spécifications sur la dimension maximale, la dureté et l'angularité des granulats sont identiques à celles des graves-bitume. Les teneurs en fines doivent rester dans les proportions suivantes :

- couche de base : 4 à 8 %
- couche de fondation : 3 à 7 %

Le dosage en liant est compris entre 3 et 4%. Le bitume de base peut ne pas être très dur et sa teneur dans l'émulsion est égale à 60 à 65%. Les classes de bitume les plus fréquemment utilisées sont :

- bitume 80/100 pour les trafics élevés ;
- bitume 180/220 pour les trafics moyens et faibles ou les travaux de reprofilage.

II.2. Les matériaux utilisés en couche de roulement

Comme mentionné au chapitre I, la couche de roulement doit répondre à plusieurs fonctions (sécurité, confort, étanchéité, distribution des charges). Ces aptitudes dépendent fortement de la nature des matériaux et de la technologie utilisées. Généralement les techniques employées en couche de roulement ne répondent pas toujours à la totalité de ces exigences, il est donc nécessaire pour le concepteur de trouver des compromis entre les qualités contradictoires des diverses techniques de réalisation de revêtement.

On distingue principalement deux grands groupes de revêtements :

- les enduits superficiels ;
- les enrobés hydrocarbonés à chaud regroupant :
 - les bétons bitumineux ;
 - les enrobés denses ;
 - et les mortiers bitumineux (sand-asphalt, sheet-asphalt, micro-béton)

II.2.1. Les enduits superficiels [cf. FM11]

« Un enduit superficiel est un film de liant répandu sur la surface à revêtir, sur lequel une couche de granulats est répandue et cylindrée. »[5] Selon qu'on utilise une ou plusieurs couches de liants, on parlera d'enduits monocouche, bicouche ou tricouche. Suivant qu'on emploie un ou deux classes de granulats, on parlera de simple gravillonnage ou double gravillonnage.

Les enduits superficiels, du fait de leur coût de réalisation relativement moins cher, comparé aux autres techniques, sont les revêtements les plus rencontrés au Sénégal. Ils présentent une bonne rugosité, améliorent l'étanchéité de surface et s'adaptent assez bien à notre contexte puisque les trafics sont relativement faibles. Cependant, ils n'ont aucun apport structural.

Les granularités utilisées sont généralement le 4/6.3, le 6.3/10, 10/14 (au Sénégal on utilise plus souvent du 3/8 ou 8/16) et les granulats doivent satisfaire à beaucoup d'exigences portant sur:

- la dureté et la résistance au polissage ;
- la forme et l'angularité pour assurer une bonne rugosité ;
- la propreté évaluée à partir du pourcentage de particules inférieures à 0.5mm et de celui des éléments inférieurs à 5 μ m (il doit être impérativement inférieur à 0.05% du poids total).

Le choix du liant est fonction du niveau de trafic, de la période de mise en œuvre et de l'état du support. On peut utiliser des bitumes purs (80/100 ou 180/220), des bitumes fluxés ou fluidifiés, des émulsions avec une teneur en bitume pur variant entre 50 et 69% ou des bitumes modifiés.

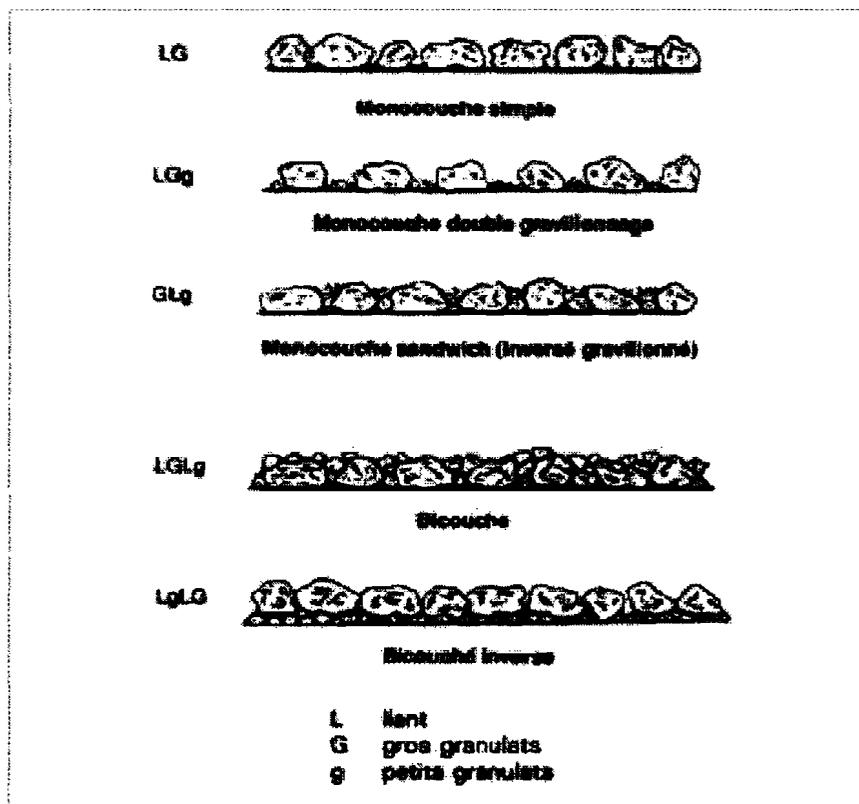


Figure II.1 – Différents types d'enduits superficiels [5]

II.2.2. Les enrobés denses [cf. FM12]

« Un enrobé dense de granularité 0/D est un mélange de gravillons, de sables, de fillers et de bitume. » [11]

Les enrobés denses ont un pourcentage de vides compris entre 10 et 12 % relativement élevé. Leur pourcentage de filler, de l'ordre de 5 %, est faible et leur fuseau granulométrique est assez large.

II.2.3. Les bétons bitumineux [cf. FM13]

« Un béton bitumineux de granularité 0/D est un enrobé dense, très élaboré, constitué par le mélange d'éléments concassés (répartis selon des classes granulaires rigoureuses), de sable de concassage (de granularité aussi constante que possible) et de bitume. » [11]

Les granulats utilisés doivent être :

- durs (LA) ;
- résistants au polissage (CPA) ;
- propres (ES) ;
- de bonne forme (rapport de concassage R_c)

Les bétons bitumineux ont un pourcentage de vides de 5 % en moyenne, inférieur à celui des enrobés denses qui est de l'ordre de 10 %. Ils sont caractérisés par leur pourcentage de filler élevé et l'étroitesse de leur fuseau granulométrique.

Le liant peut être un bitume ou un bitume-goudron et son dosage dépend du pourcentage de filler. Les essais Marshall et Duriez permettront de définir les performances des bétons bitumineux.

II.2.4. Le sand-asphalt [cf. FM14]

« Un sand-asphalt de granularité 0/D (en général 0/5) est un mélange de sable bien gradué et de bitume. » [11]

Le sand-asphalt appartient, avec les « sheet-asphalt » et les « micro-béton », à la famille des mortiers bitumineux. Bien qu'il soit très sensible aux fortes variations journalières de température et à l'imbibition, il est couramment utilisé sous climat tropical et a donné des résultats satisfaisants au Sénégal, au Bénin et en Côte d'Ivoire.

Les exigences liées à l'utilisation d'un sable pour la confection d'un sand-asphalt sont relatives à :

- **la qualité et la nature des granulats** : diamètre maximal D_{max} (3 – 4 ou 5 mm), la propreté (ES), la dureté de la roche mère ($LA < 40$), la qualité du filler d'apport ;
- **la granularité** : un fuseau granulométrique propre aux sand-asphalt est défini ;
- **la qualité et le dosage du liant** : les bitumes 80/100, 60/70 et 40/50 peuvent être utilisés avec une préférence pour les bitumes durs dans les zones de forte chaleur. Le dosage est généralement compris entre 6 et 8%.

Conclusion

On ne saurait dire que le Sénégal soit « géologiquement » pauvre. Des ressources importantes en matériaux routiers existent, seulement il faudrait les identifier et réaliser suffisamment d'expérimentations pour maîtriser leur comportement. Les projets routiers pouvant dans certaines zones se heurter à la rareté de matériaux de bonne qualité, il devient impératif pour les intervenants du secteur de mener de vastes campagnes de prospections en vue de voir à quel point il serait possible d'utiliser les matériaux locaux à proximité même s'ils sont de qualité moindre. Cette démarche a déjà été enclenchée par l'AATR qui a commandé, auprès du CEREEQ et du cabinet SIMON & CHRISTIANSEN AFRIQUE, une étude intitulée « Campagne de recherche de matériaux et cartographie des emprunts et carrières au Sénégal ». Cette étude devrait à terme déboucher sur la création d'une base de données répertoriant pour chaque carrière les caractéristiques des matériaux.

Le Sénégal n'étant pas producteur de pétrole, nous ne manquerons de signaler la cherté des liants hydrocarbonés. Le concepteur devra donc accorder une grande importance à cet aspect d'autant plus que le basalte qui est généralement utilisé pour les bétons bitumineux n'est exploité que dans la région ouest du Sénégal (carrière de Diack).

III. PRESENTATION DES METHODES DE DIMENSIONNEMENT

Comme pour les autres ouvrages de génie civil, la structure de la route doit être définie à la suite d'un dimensionnement. Étant fonction des matériaux utilisés, des techniques de réalisation et des caractéristiques du trafic, le dimensionnement des chaussées a connu d'importantes évolutions. Des premières méthodes empiriques importées des États-unis, à l'apparition des premiers modèles rationnels, dont l'utilisation est devenue plus facile avec le développement de l'outil informatique, l'ingénieur a toujours cherché à comprendre le fonctionnement mécanique de la chaussée sous sollicitations, malgré l'existence de beaucoup de paramètres probabilistes. Cela nous amène à différencier deux orientations principales rencontrées dans les méthodes de dimensionnement : l'approche empirique et l'approche théorique.

III.1. L'approche empirique

La démarche empirique est fondée sur l'observation du comportement sous trafic des chaussées réelles ou expérimentales. Ayant préalablement défini un critère fixant la fin de vie de la chaussée, on détermine, en utilisant ce critère, la durée de vie des chaussées observées. Par des lois statistiques, on établira ensuite des relations entre :

- la durée de vie et les caractéristiques géométriques de la chaussée ;
- la durée de vie et les propriétés mécaniques des matériaux ;
- la durée de vie et une mesure globale des propriétés mécaniques de la structure de chaussée et le sol de fondation.

Beaucoup d'expérimentations ont été réalisées en Amérique du Nord et en Grande Bretagne ; nous citerons à titre d'exemple :

- Bates experimental road test, Illinois, 1920
- Route expérimentale du Maryland, chaussées rigides, 1941
- WASHO road test, Idaho, 1953
- AASHO road test, Illinois, 1958
- Brampton Road test, Ontario, 1970
- SHRP-LTPP, Amérique du Nord, 1987
- MnRoad, Minnesota, 1992

Les méthodes empiriques présentent cependant quelques inconvénients :

- le nombre de sections expérimentales étant quelquefois important, l'investissement est très coûteux;

- le temps de réponse est long car il n'y a pas de possibilité d'accélération du trafic;
- les résultats ne sont applicables qu'aux matériaux étudiés. Lorsque les conditions environnementales et les matériaux disponibles sont différents de ceux de l'expérimentation, il devient très difficile d'appliquer précisément les résultats des essais.

Nous tenterons dans ce qui suit de présenter les méthodes empiriques les plus utilisées pour le dimensionnement des chaussées au Sénégal en insistant plus amplement sur la méthode du CEBTP qui paraît la mieux adaptée à notre contexte.

III.1.1. La méthode du CBR [11]

Elle a été conçue par O. J. PORTER du California State Highway Department dès 1938 à la suite d'une expérimentation de 14 années sur les routes californiennes. PORTER trouva une relation entre l'indice CBR d'un sol et l'épaisseur de chaussée minimale nécessaire pour empêcher la rupture par déformation plastique de la chaussée. Il a été établi un abaque donnant l'épaisseur du corps de chaussée pour deux types de catégories de trafic : un trafic moyen-lourd (équivalent au passage d'une roue maximale de 5.4 tonnes) et un trafic léger (équivalent au passage d'une roue maximale de 3.1 tonnes).

Le Corps des Ingénieurs de l'Armée Américaine se basant sur les courbes du California State Highway Department établira, par extrapolation théorique, ses propres abaques d'épaisseur dont Peltier donnera l'expression simplifiée suivante :

$$e = \frac{100 + 150\sqrt{P}}{CBR + 5}$$

e : épaisseur de la chaussée en cm

P : poids de la roue en tonnes

CBR : valeur de l'indice CBR en %

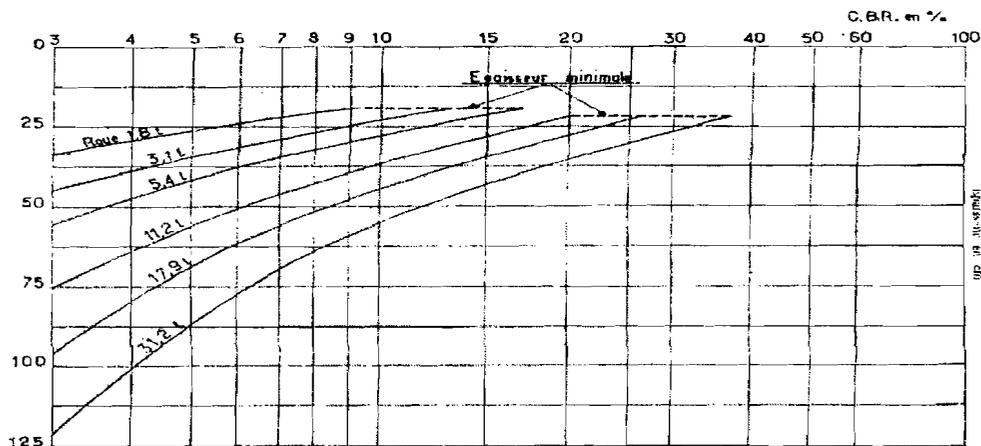


Figure III.1 : Abaque du corps des Ingénieurs de l'Armée Américaine [11]

III.1.2. La méthode du Road Research Laboratory [11]

Dérivée de la méthode CBR, la méthode du RRL (actuellement TRRL) intègre deux nouvelles hypothèses :

- l'effet de répétition des charges sur l'épaisseur requise obéit à une loi logarithmique (cet effet était préalablement pris en compte par une majoration de 20% du poids de la roue maximale considérée) ;
- l'effet des véhicules d'un poids total inférieur à 3 tonnes est négligeable.

La formule de calcul de l'épaisseur de la chaussée de la méthode CBR a ainsi été améliorée :

$$e = \frac{100 + 150 \sqrt{P \left[75 + 50 \log \left(\frac{N}{10} \right) \right]}}{CBR + 5}$$

e : épaisseur de la chaussée en cm

P : poids de la roue en tonnes

CBR : valeur de l'indice CBR en %

N : nombre moyen journalier de véhicules de plus de 1.5 tonnes à vide circulant sur la chaussée

La méthode du RRL a fait l'objet de la Road Note N°29 en 1960 qui sera par la suite corrigée et améliorée en 1966 dans sa seconde édition. La Road Note N°29 préconise :

- la construction en un temps d'une chaussée conçue pour une durée de vie de 20 ans ;
- la limitation de la profondeur maximale des ornières à 2 cm en fixant d'une part les épaisseurs requises pour le revêtement et la couche de base et en définissant, d'autre part, la qualité des matériaux constituant ces couches. Seule l'épaisseur de la couche de fondation varie en fonction de la valeur du CBR du sol de forme.

Dans sa 3^{ème} édition de 1971, la Road Note N°29 connaîtra de nouvelles modifications :

- le trafic est évalué en termes d'essieux normaux de 8.1 tonnes (ce qui n'était pas encore le cas dans la précédente édition) ;
- les durées de service recommandées sont de 20 ans pour les chaussées souples et 40 ans pour les chaussées rigides ;
- le dimensionnement est obtenu pour différents matériaux utilisables aux divers niveaux de la chaussée sous forme de courbes continues donnant l'épaisseur minimale en fonction du trafic ;

- les dimensionnements obtenus par la Road Note N°29 sont valables pour les voies de circulation supportant une circulation lente. Dans le cas de voie à circulation rapide, des coefficients « minorateurs » pourront être appliqués.

Nous présentons ci-dessous les différents abaques produits par la méthode du RRL. Ils sont tirés du « Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques ».

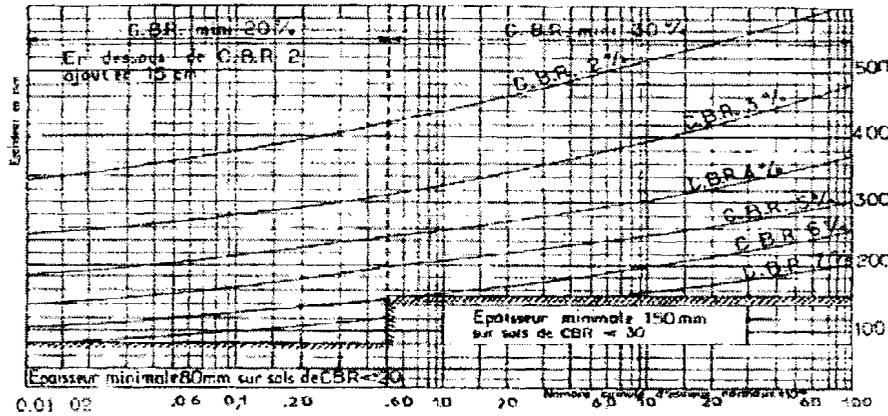


Figure III.2 : Road Note N°29 : Couche de fondation en matériaux non traités [11]

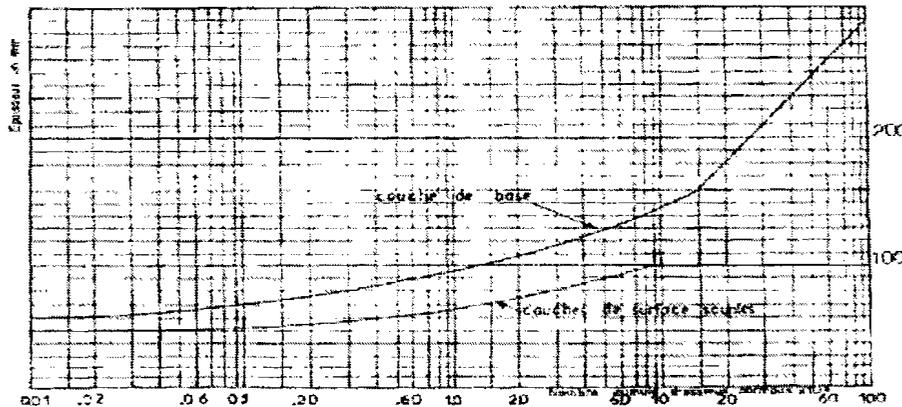


Figure III.3 : Road Note N°29 : Couche de surface souples et couches de base en macadam enrobé[11]

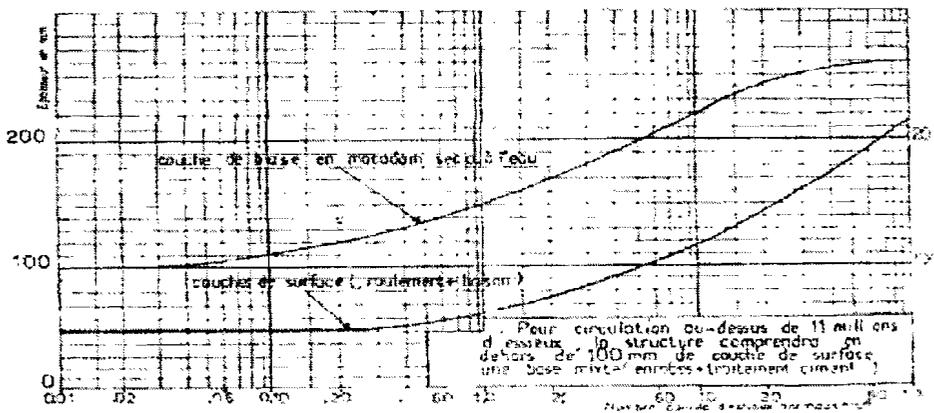


Figure III.4 : Road Note N°29 : Couche de surface souples et couches de base en macadam non traité [11]

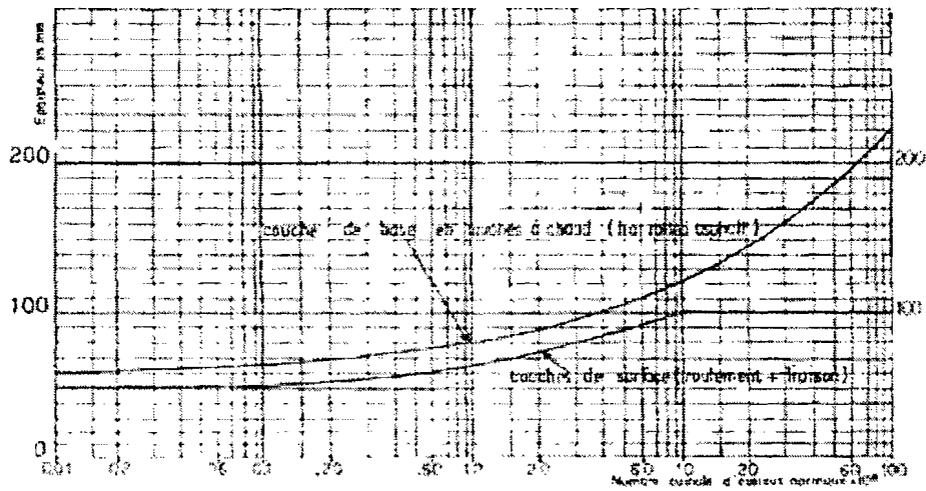


Figure III.5 : Road Note N°29 : Couche de surface souples et couches de base en béton bitumineux [11]

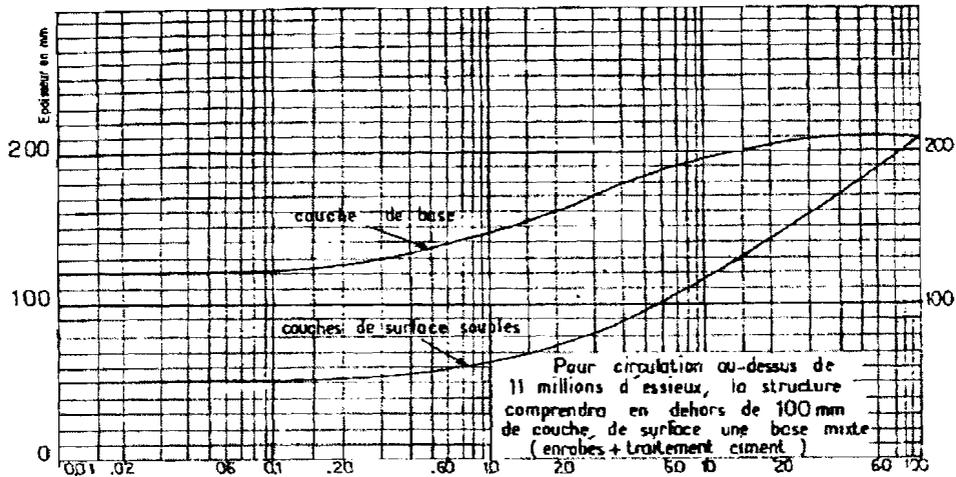


Figure III.6 : Road Note N°29 : Couche de surface souples et couches de base traitées aux liants hydrauliques [11]

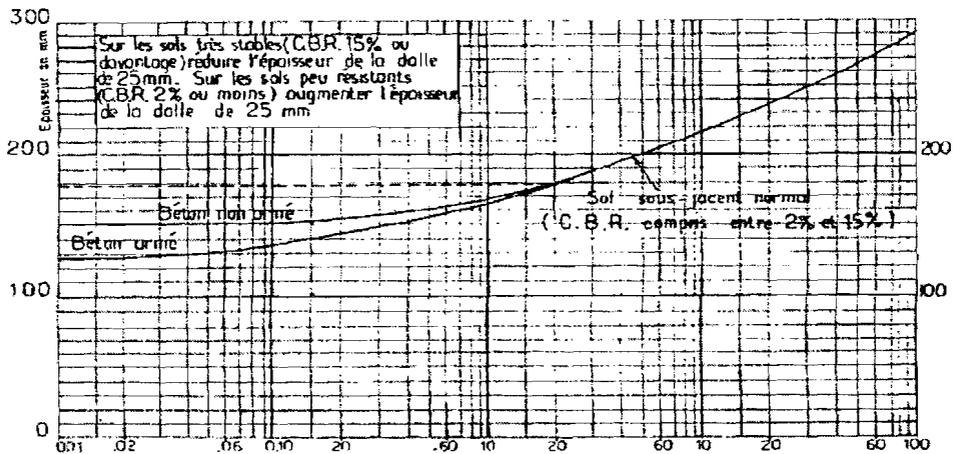


Figure III.7 : Road Note N°29 : Dalle de béton [11]

III.1.3. Les méthodes dérivées des essais AASHO [11]

De toutes les expérimentations empiriques, les essais AASHO (American Association of State Highway Officials) sont de loin celles dont les résultats ont été les plus utilisés. Ils se sont déroulés de 1957 à 1961 sur 240 sections de chaussées souples, 271 sections de chaussées rigides et environ 50 sections de chaussées souples avec couche de base stabilisée. Chacune de ces chaussées ayant reçu en moyenne 1 million de charges roulantes, il a été possible de :

- établir des lois d'équivalence entre charges de poids différents;
- relier statistiquement les déflexions à la structure de la chaussée;
- définir un indice de qualité de service des chaussées PSI (Present Serviceability Index) encore appelé « Indice de viabilité »;
- un indice d'épaisseur E pouvant s'exprimer par une forme linéaire des épaisseurs des différentes couches :

$$E = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3$$

D_1 : épaisseur de la couche de surface

D_2 : épaisseur de la couche de base

D_3 : épaisseur de la couche de surface

a_1, a_2, a_3 sont des coefficients d'équivalence entre couches selon leur nature :

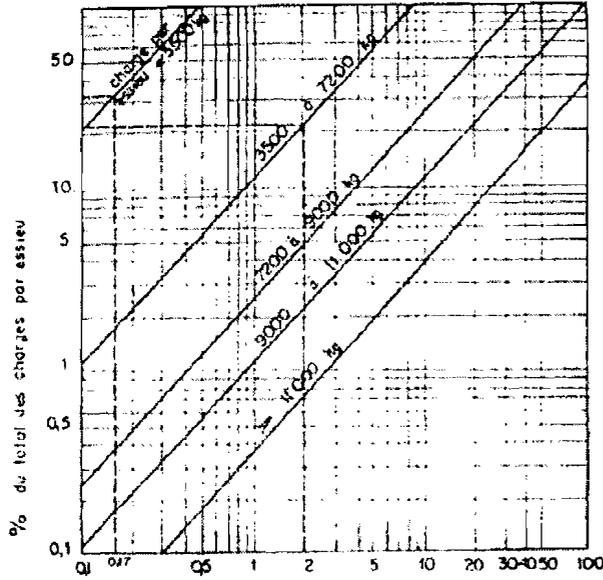
- Par exemple :
- $a_1 = 0.44$ pour une couche de surface en béton bitumineux, $D_1 \geq 5$ cm
 - $a_2 = 0.14$ pour une couche de base en pierres concassées, $D_2 \geq 8$ cm
 - $a_3 = 0.11$ pour une couche de surface en grave sableuse

III.1.3.1. La méthode Shell

C'est une méthode semi-empirique s'appuyant sur :

- la notion d'indice CBR de la forme ;
- la compatibilité entre les contraintes théoriques dues au trafic et la résistance des matériaux de chaussée ;
- les coefficients d'équivalence de trafic trouvés par la méthode AASHO.

Le principe de la méthode consiste à déterminer en fonction de la répartition des charges par essieu, un facteur de distribution des charges C . La combinaison de C , du nombre d'essieux par jour et par voie, de la durée de vie permettent d'estimer, à partir de l'abaque de la figure III.8, le trafic équivalent. A partir de cette donnée et du CBR du sol de plate-forme, on peut en utilisant les abaques de la figure III.9, déterminer l'épaisseur des couches de la chaussée.

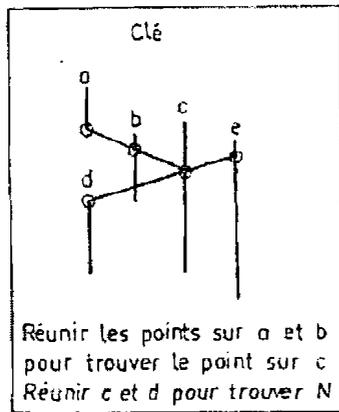


CALCUL DU FACTEUR C DE DISTRIBUTION DES CHARGES

Exemple :

Composition des charges		Coefficient C correspondant
Charges	%	
< 3,5 T	32,7	0,17
3,5 < P < 7,2 T	22,3	2
7,2 < P < 9 T	18,8	7,5
9 < P < 11 T	9,4	8,5
> 11 T	16,8	40,0
	100 %	c = 58,17

Contribution au facteur C
CALCUL DU TRAFIC EQUIVALENT N EN NOMBRE D'ESSIEUX DE 10 TONNES



- (a) C = 58,17
- (b) nombre d'essieux par jour et par voie = 1000
- (d) durée de vie = 15 ans
N = 3 x 10⁶ essieux de 10 tonnes

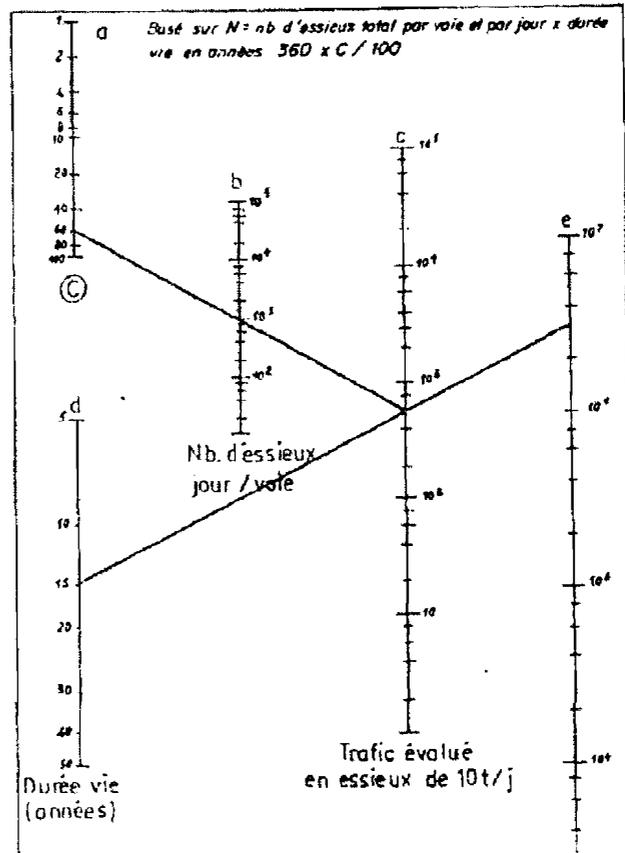


Figure III.8 : Méthode Shell : calcul du trafic équivalent N en nombre d'essieux de 10t [11]

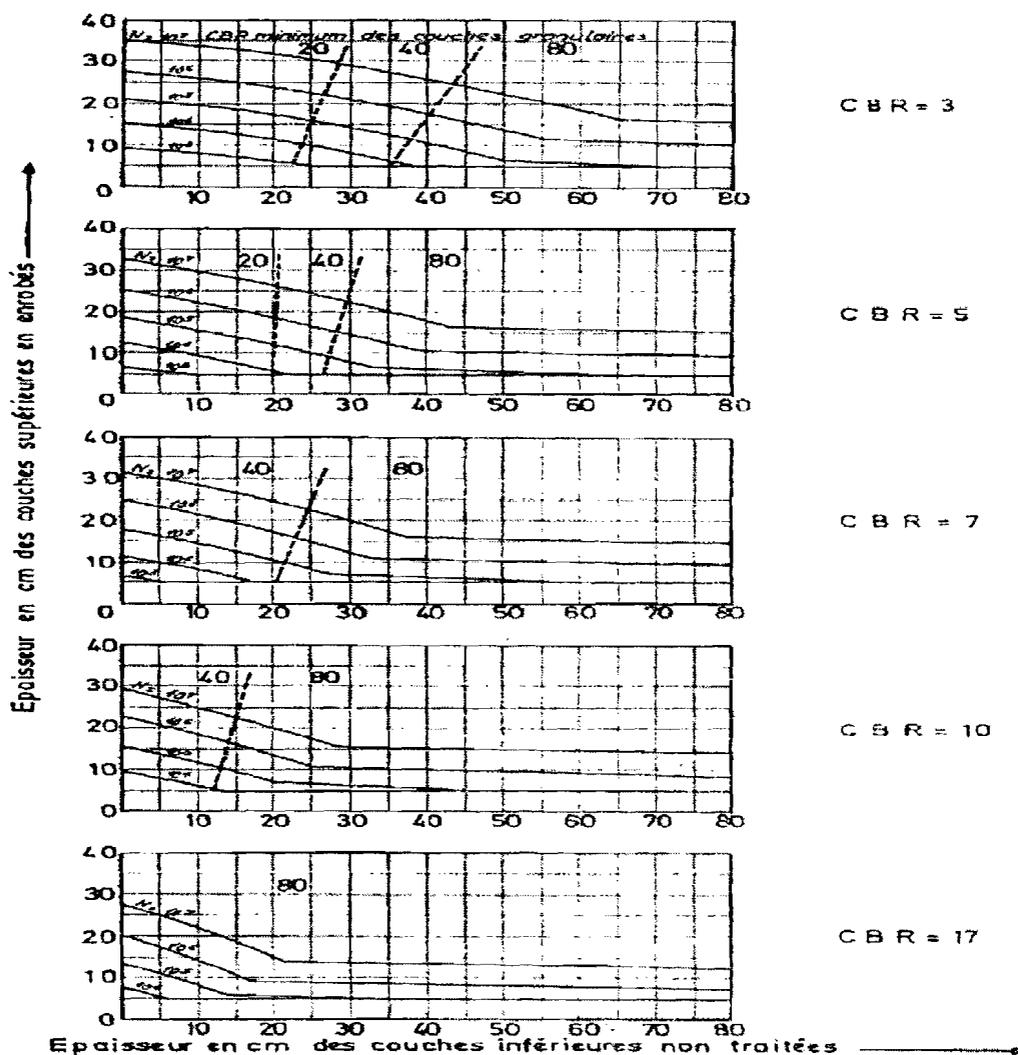


Figure III.9 : Méthode Shell : détermination des épaisseurs de chaussée [11]

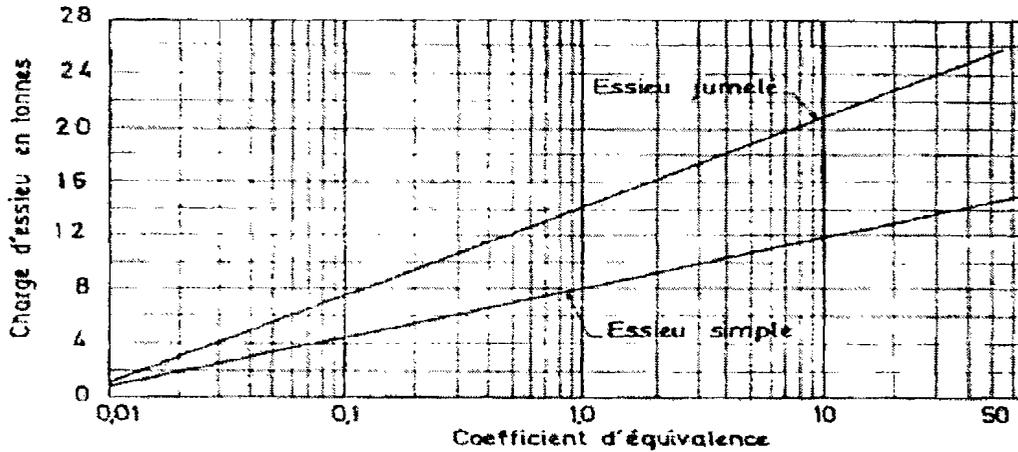
III.1.3.2. La méthode de Shook and Finn (Asphalt Institute)

Elle admet comme principes fondamentaux que :

- pour un trafic donné, le CBR de la forme conditionne l'épaisseur de la chaussée ;
- pour un sol de qualité ou de portance constante, l'épaisseur requise augmente en fonction du trafic ;
- le trafic est exprimé par un nombre de passages équivalents de l'essieu standard de 8.1 tonnes ; les essieux de poids différents étant convertis grâce à des coefficients d'équivalence ;
- les pouvoirs de répartition de contraintes des différents matériaux sont pris en compte grâce à des coefficients d'équivalence tirés d'essais ;

Les abaques de la figure III.10 permettent de déterminer l'épaisseur équivalente de chaussée nécessaire qui devra être convertie en épaisseur réelle en fonction des matériaux disponibles et des coefficients d'équivalence.

COEFFICIENT D'ÉQUIVALENCE DU TRAFIC
(CHAUSSEES SOUPLES)



CALCUL DE L'ÉPAISSEUR ÉQUIVALENTE D'UNE CHAUSSEE

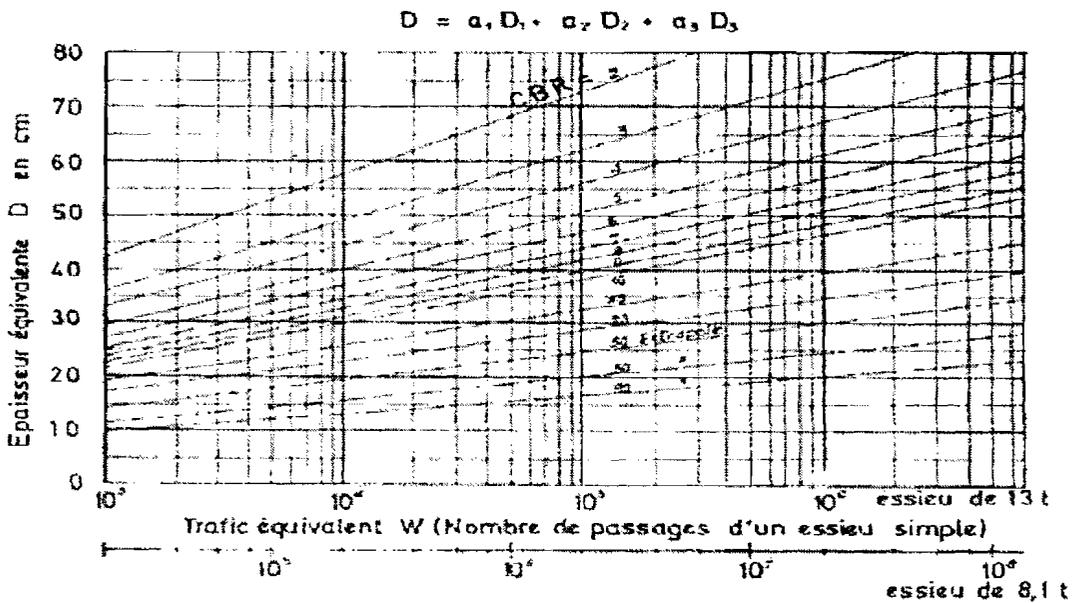


Figure III.10 : Méthode de l'Asphalt Institute [11]

III.1.4. La méthode du CEBTP [11]

Elle est sans doute la mieux adaptée au contexte environnemental, technologique et économique sénégalais car étant le fruit d'expérimentations sur le comportement et le renforcement de 7000 km de chaussées bitumées en Afrique tropicale et à Madagascar.

La méthode du CEBTP a deux principes de base :

- « Dans le cas des chaussées ne comportant aucune couche tant soit peu rigidifiée, la méthode admet que l'indice portant de la forme d'une part et l'intensité du trafic d'autre part, déterminent l'épaisseur totale de la chaussée ;

- Dans le cas des chaussées comportant une ou plusieurs couches susceptibles, par leur raideur, d'une rupture en traction, le dimensionnement précédent qui vise uniquement à éviter le poinçonnement de la forme, doit être complété par une analyse théorique dont l'objet est de vérifier que les contraintes effectives de traction développées à la base des couches rigidifiées sont compatibles avec les performances probables de ces matériaux ».

En vue de réduire les risques de rupture de natures particulières, quelques directives techniques, portant sur le choix ou la mise en œuvre des matériaux, accompagnent la méthode du CEBTP :

- « un minimum de compacité au niveau supérieur des terrassements et l'élimination sur les trente derniers centimètres, des matériaux instables ou gonflants... ;

- un minimum de compacité et une portance ou stabilité adéquate au niveau des couches de base et de fondation... ;

- une dureté satisfaisante des agrégats destinés à constituer les couches de base ou de surface... ;

- la réalisation de revêtements minces et déformables... ;

- enfin, au niveau des accotements et dans la mesure du possible, la réalisation d'une butée et d'une imperméabilisation suffisante, grâce à des conditions de mise en œuvre et à un choix de matériaux semblables à ceux utilisés dans le corps même de la chaussée (revêtement exclu). »

Quatre classes de trafic ont été définies par la méthode du CEBTP et elles sont exprimées par le trafic cumulé de poids lourds circulant pendant une durée de vie probable de l'ordre de 10 à 12 ans , sur toute la largeur de la chaussée. Dans cette méthode, le poids lourd est défini comme un véhicule ayant un poids total en charge supérieur à 3 tonnes.

Classe de trafic	Nombre équivalents PL	Trafic équivalent en veh./j
T1	< 5x 10 ⁵	< 300 veh./j
T2	5x 10 ⁵ à 1.5x10 ⁶	300 à 1000 veh./j
T3	1.5x10 ⁶ à 4x 10 ⁶	1000 à 3000 veh./j
T4	4x10 ⁶ à 10 ⁷	3000 à 6000 veh./j

Tableau III.1 : Classes de trafic utilisées dans la méthode CEBTP [11]

Le tableau suivant permet de déterminer, en fonction de la classe de plateforme et de l'intensité du trafic, les épaisseurs totales requises en couche de fondation, de base et de surface :

CBR compris dans les intervalles	Trafic cumulé des poids lourds dans les deux sens et correspondant à la durée de vie choisie (P.L. = poids total > 3 tonnes)							
	< 5x 10 ⁵		5x 10 ⁵ à 1.5x10 ⁶		1.5x10 ⁶ à 4x 10 ⁶		4x10 ⁶ à 10 ⁷	
	Fondation (cm)	Base (cm)	Fondation (cm)	Base (cm)	Fondation (cm)	Base (cm)	Fondation (cm)	Base (cm)
5-10	20	15	25	15	25	20	30	20
10-15	15	15	20	15	20	20	25	20
15-30	10	15	15	15	15	20	20	20
30-80	0	15	0	15	0	20	0	20
80	0	0	0	0	0	0	0	0
Revêtement	Type 1		Type 2		Type 3		Type 4	

Tableau III.2 : Épaisseur des couches de chaussée selon la méthode CEBTP [11]

Connaissant le type de revêtement proposé par le tableau III.2, on peut déterminer la composition et les variantes de la couche de surface en utilisant le tableau ci-après :

Formule recommandée	Variante
Type 1 : Bicouche, puis ultérieurement monocouche d'entretien	3 cm de sand asphalt ou 2 cm d'enrobés denses
Type 2 : Bicouche, puis ultérieurement monocouche d'entretien	3.5 cm de sand asphalt ou 3 cm d'enrobés denses
Type 3 : Bicouche, puis ultérieurement 2.5 cm d'enrobés entretien	4 cm d'enrobés denses
Type 4 : Bicouche, puis ultérieurement 3 cm d'enrobés entretien	5 cm d'enrobés denses

Tableau III.3 : Épaisseur des couches de chaussées selon la méthode CEBTP [11]

Le tableau III. 4 définit la nature des différents matériaux utilisables en couche de fondation et en couche de base selon l'intensité du trafic poids lourds .

Trafic cumulé	Couche de fondation	Couche de base
< 5x 10 ⁶ poids lourds	<ul style="list-style-type: none"> - sables cohésifs - graveleux latéritiques naturels - sables argileux améliorés in situ granulométriquement - scories et laves volcaniques - cinérites et pouzzolanes - banco-coquillages - grèves sableuses - tout-venant de concassage 0/60 	<ul style="list-style-type: none"> - graveleux latéritiques ou non latéritiques, naturels ou améliorés (au ciment, au concassé ou à la chaux) - sol-bitume au travail planté - sol-chaux, sol-ciment - scories et laves sélectionnées - banco-coquillages améliorés au bitume - tout venant de concassage 0/40
5x 10 ⁶ à 1.5x10 ⁷ poids lourds	<ul style="list-style-type: none"> - graveleux latéritiques naturels (améliorés au besoin) - scories et laves - banco-coquillages améliorés au bitume - sol-bitume - sol-chaux, sol-ciment - tout-venant de concassage 0/60 	<ul style="list-style-type: none"> - graveleux latéritiques de très bonne qualité (améliorés au besoin) - sol-bitume mélangé en centrale - scories et laves améliorées - tout venant de concassage 0/40 - sol-chaux, sol-ciment
1.5x10 ⁷ à 4x 10 ⁷ poids lourds	<ul style="list-style-type: none"> - graveleux latéritiques de bonne qualité (améliorés au besoin) - sol-bitume mélangé en centrale - scories et laves améliorées - banco-coquillages améliorés - tout venant de concassage 0/60 - sol-chaux, sol-ciment 	<ul style="list-style-type: none"> - graveleux latéritiques d'excellente qualité (de préférence améliorés) - tout venant de concassage 0/40 - sol fins améliorés en centrale
4x10 ⁷ à 10 ⁸ poids lourds	<ul style="list-style-type: none"> - graveleux latéritiques d'excellente qualité (de préférence améliorés) - tout venant de concassage 0/60 - sol-bitume en centrale - sol-chaux ou sol-ciment en centrale 	<ul style="list-style-type: none"> - graveleux latéritiques améliorés en centrale - tout venant de concassage 0/40 (de préférence améliorés au ciment et au bitume) - grèves bitume ou grèves ciment

Tableau III. 4 : Nature des matériaux utilisables en corps de chaussée [11]

III.2. L'approche rationnelle et ses modèles mathématiques [2]

Basée sur des principes de la mécanique des chaussées, l'approche rationnelle procède de la manière suivante :

- modéliser le comportement mécanique de la chaussée sous l'effet du trafic ;
- à partir de ce modèle, estimer les déformations et contraintes subies par les matériaux de chaussées ;
- comparer ces déformations et contraintes avec les valeurs admissibles.

L'approche théorique, la plus couramment utilisée de nos jours, présente quelques particularités qui introduisent dans le dimensionnement plusieurs paramètres ou facteurs pouvant plus ou moins influencer la tenue ou le comportement de la chaussée.

• **Le choix d'un objectif** : ce choix peut très simplement se limiter à définir une durée de vie pour la chaussée à construire. Cette démarche peut s'avérer erronée dans la mesure où la chaussée connaît durant son cycle de vie des travaux d'entretien dont il faut tenir compte. Une autre approche serait de définir, après la durée de vie, la « fin de la vie » de la chaussée. Cette « fin de la vie » peut être caractérisée par :

- la proportion de la surface de chaussée présentant des dégradations structurales ;
- la valeur du PSI (Present Serviceability Index) qui est déterminée à partir des défauts d'uni, des fissurations de fatigue et de la profondeur des ornières ;

• **L'aspect probabiliste** : le dimensionnement ne devrait pas ignorer la dispersion des propriétés des sols-support et des matériaux de chaussée, le phénomène aléatoire de rupture d'un matériau par fatigue, la dispersion de l'épaisseur des couches de chaussées.

• **Les conditions environnementales** : elles sont d'une influence notable sur le comportement des matériaux de chaussées. La teneur en eau des sols détermine leurs propriétés (paramètres d'état par exemple) et la température ambiante conditionne les propriétés des matériaux bitumineux et la fissuration sur les matériaux traités aux liants hydrocarbonés (fissurations de retrait thermique par exemple).

• **les conditions de chargement** : outre la modélisation du mode des charges par essieu, il faut connaître avec suffisamment de précision la densité du trafic poids lourds devant emprunter la chaussée et son accroissement.

• **le modèle** : la complexité du calcul d'une structure routière rend nécessaire la génération d'un modèle de comportement mécanique prenant en compte la charge roulante appliquée en surface, les variations de contraintes dans les massifs de matériaux, les conditions aux limites (transmission des contraintes et déformations aux interfaces entre couches successives), le comportement des matériaux en réponse aux sollicitations induites par le trafic. Nous verrons donc qu'il est assez complexe de trouver un modèle réellement fidèle au comportement de la chaussée sous chargement : quelques suppositions et approximations seront donc nécessaires pour l'élaboration des modèles.

• **le calage des modèles** : les modèles ayant fait recours à des approximations, des mesures in situ des valeurs de contraintes et déformations et d'autres observations sont nécessaires pour

affiner le modèle de calcul. L'approche théorique intègre donc dans son évolution une « phase empirique » sans laquelle elle ne saurait être totalement à point.

Plusieurs modèles de comportement et de dimensionnement des chaussées ont été développés mais nous ne présenterons, dans ce qui suit, que quelques-uns.

III.2.1. Le modèle de Boussinesq (1885)

Dans le modèle de Boussinesq, on suppose que le corps granulaire n'est pas trop différent du sol-support et qu'ainsi, la pression exercée par les pneumatiques se répartit comme dans un massif de sol.

Hypothèses :

- Matériaux homogènes et isotropes ;
- Comportement linéaire élastique des matériaux ;
- Charge modélisée par une pression q_0 sur un cercle de rayon a .

Le problème revient à déterminer la profondeur H à laquelle la pression q_0 a été suffisamment diffusée de manière à ne pas dépasser la contrainte admissible $(\sigma_z)_{ad}$ du sol support élastique de module d'Young E_2 et de coefficient de Poisson ν_2 .

Le module d'Young E_1 du corps de chaussée étant supérieur à celui du sol support, on peut faire correspondre à la profondeur H une profondeur H' qui lui est inférieure selon une règle simple :

$$H' = H \times f\left(\frac{E_1}{E_2}\right)$$

$$\text{Où } f\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \leq 1$$

La contrainte verticale σ_z est maximale à l'aplomb de la charge q_0 de rayon a et à une profondeur z , elle prend la valeur suivante:

$$\sigma_z = q_0 \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right]$$

La déformation verticale induite par la charge q_0 de rayon a à une profondeur z est :

$$\varepsilon_r = \frac{(1+\nu_2)q_0}{E_2} \left[(1-2\nu_2) + \frac{2\nu_2 z}{(a^2+z^2)^{1/2}} - \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{3/2}} \right] \quad [13]$$

La contrainte radiale σ_r sous le centre de la charge q_0 de rayon a à une profondeur z est :

$$\sigma_r = q_0 \left[(1+2\nu_2) - \frac{2(1+\nu_2)z}{(a^2+z^2)^{1/2}} + \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{3/2}} \right] \quad [13]$$

La déformation radiale induite par la charge q_0 de rayon a à une profondeur z est :

$$\varepsilon_r = \frac{(1+\nu_2)q_0}{2E_2} \left[(1-2\nu_2) - \frac{2(1-\nu_2)z}{(a^2+z^2)^{1/2}} + \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{3/2}} \right] \quad [13]$$

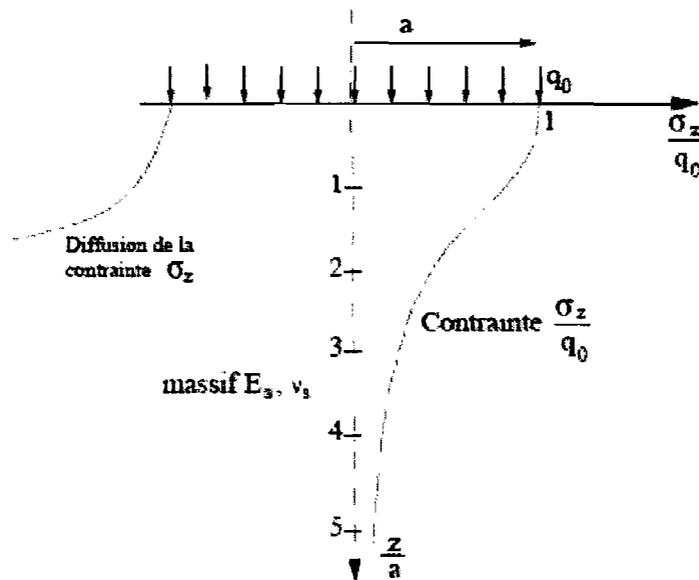


Figure III.11 : Diffusion des pressions dans un massif de Boussinesq [2]

Nous remarquerons d'une part que la contrainte verticale est indépendante du module d'Young E_2 et d'autre part que l'épaisseur de la chaussée est proportionnelle au rayon du cercle de charge a :

$$\left[\frac{\left(\frac{H}{a}\right)^3}{\left[1 + \left(\frac{H}{a}\right)^2\right]^{3/2}} \right] = 1 - \frac{\sigma_z}{q_0}$$

Une très faible contrainte admissible sur le massif conduit à de très fortes épaisseurs dans le cas où le module d'Young du matériau n'est trop éloigné de celui du sol-support.

III.2.2. Les modèles bicouches

Lorsque les sollicitations du trafic deviennent importantes et/ou que les contraintes admissibles sont très faibles (de l'ordre de $1/10$ à $1/20$ de q_0) l'épaisseur nécessaire pour diffuser les contraintes dans un corps granulaire devient importante. Il faut généralement ainsi faire recours au traitement par un liant hydraulique pour augmenter le module d'Young E_1 du corps de chaussée. Cet aspect introduit de nouvelles considérations dans le dimensionnement qui revient donc à :

- limiter la contrainte verticale sur le sol-support ;
- limiter la contrainte de traction par flexion à la base des couches traitées.

Le modèle de Boussinesq ne convenant pas à ce problème, il est nécessaire de faire appel à d'autres modèles de la mécanique des chaussées tels que les modèles de Hogg ou de Westergaard.

III.2.2.1. Le modèle de Hogg (1938)

Le modèle de Hogg est la transposition du modèle de Boussinesq dans un modèle bicouche. Intégrant un problème de flexion, la méthode admet les hypothèses simplificatrices de Navier pour les plaques minces :

- le plan moyen est confondu avec la fibre neutre ;
- les sections planes transversales restent planes pendant la déformation ;
- les contraintes normales suivant une direction transversale peuvent être négligées.

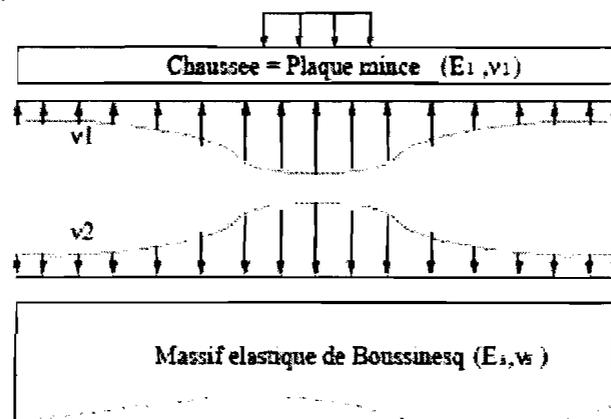


Figure III.12 : Schéma du modèle de Hogg

Les déplacements verticaux de la plaque satisfont à l'équation de Lagrange pour les plaques minces :

$$D.\Delta^2w = p$$

$$D = \frac{E_1 \times H^3}{12 \times (1 - \nu_1^2)} : \text{caractéristique de la rigidité de la plaque}$$

p : sommes des pressions verticales

$$p = \sigma_z - q_0 \text{ à l'aplomb du cercle de charge}$$

$$p = \sigma_z \text{ à l'extérieur du cercle de charge}$$

$$\Delta^2 = \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right)^{(2)} : \text{double laplacien en coordonnées polaires}$$

Le problème comporte deux inconnues : la contrainte verticale σ_z et la déformation verticale w . Une première relation peut être obtenue à partir de l'équation de Lagrange : $\Delta^2w = \frac{\sigma_z - q_0}{D}$; la deuxième relation étant obtenue en assimilant les déplacements verticaux de la fibre neutre à ceux du massif et en utilisant les relations de Boussinesq.

En supposant que la chaussée glisse parfaitement sur son support, on trouve comme expression de la contrainte de traction à la base de la plaque :

$$\sigma_T = \frac{P}{H^2} \times \frac{1 + \nu}{2\pi} F \left(\frac{E_1}{E_1} \times \frac{H^3}{a^3} \right)$$

$P = q_0 \pi a^2$: charge appliquée

F : fonction de la rigidité de la chaussée exprimée par $\frac{E_1}{E_1} \times H^3$

III.2.2.2. Le modèle de Westergaard (1926)

L'approche introduite par Westergaard, très adaptée au comportement des chaussées rigides car prenant en compte le chargement au bord de la dalle, est très différente de celle de Hogg et Boussinesq sur la schématisation du sol-support. Celui-ci est assimilé à un assemblage de ressorts dont le déplacement vertical en un point w est proportionnel à la pression verticale en ce même point :

$$v = k \times w$$

v : contrainte verticale sur le massif

w : déplacement vertical de la plaque

k : module de réaction du sol-support

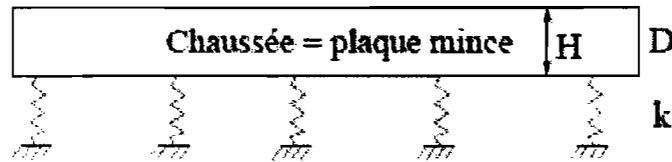


Figure III.13 : Schéma du modèle de Westergaard

L'équation de Lagrange pour les plaques minces s'écrit :

$$\Delta^2 w(r) = \frac{p(r)}{D} = \frac{v(r) - q(r)}{D}$$

$$\Delta^2 \varphi(r, z) = 0$$

$p(r)$: somme des efforts de flexion à une distance r du centre de la plaque

$$D = \frac{E_1 \times H^3}{12 \times (1 - \nu_1^2)}$$

: caractéristique de la rigidité de la plaque

$$q(r) = q_0 \text{ si } r \leq a$$

$$q(r) = 0 \text{ si } r > a$$

Le modèle de Westergaard fait apparaître la notion de rayon de rigidité de la chaussée ℓ qui est une fonction de la rigidité de la dalle E_1 et du module de réaction du sol-support k .

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{D}{k}} = \sqrt[4]{\frac{E_1 H^3}{12(1 - \nu_1^2)k}}$$

Par un changement de variable $r = \ell x$, l'équation de Lagrange devient :

$$\Delta^2 w(x) + w(x) = \frac{q(x)}{k}$$

La résolution de cette équation nécessite une transformation de Henkel qui donne par la suite :

$$w(x) = \frac{q_0}{k} \frac{a}{\ell} \int_0^{+\infty} \frac{m}{m^4 + 1} J_1\left(m \frac{a}{\ell}\right) \cdot J_0(mx) dm$$

m : variable de la transformée de x

$J_0(t)$: fonction de Bessel d'ordre 0

$J_1(t)$: fonction de Bessel d'ordre 1

Les déformations étant ainsi connues, on peut par dérivations obtenir les moments de flexion et les contraintes.

La contrainte de traction à la base de la chaussée peut être écrite sous la forme :

$$\sigma_T = \frac{P}{H^2} \times C \left(\frac{\ell}{a} \right)$$

C est une fonction croissante de ℓ qui dépend de la position de la charge.

III.2.3. Le modèle multicouches de Burmister

Le modèle multicouche de Burmister correspond plus à la configuration traditionnelle des structures de chaussée (sol-support / assise / revêtement) ou à la configuration des structures renforcées. Ce modèle traite le problème à « n couches » en appliquant les hypothèses suivantes :

- toutes les couches sont considérées comme des solides élastiques, homogènes et isotropes ;
- toutes les couches sont infinies en plan : cette hypothèse a l'inconvénient de ne pas tenir compte des effets de bord mais elle facilite grandement les calculs par l'utilisation des coordonnées cylindriques car le problème traité possède une symétrie de révolution ;
- les interfaces entre couches peuvent être collées ou décollées et une même chaussée peut comporter des interfaces collées et décollées ;
- les charges multiples peuvent être traitées par addition des effets des charges élémentaires.

La solution du modèle de Burmister est très complexe et elle nécessite :

- d'une part la résolution du problème d'élasticité en coordonnées cylindriques par la recherche d'une fonction de tension $\phi(r, z)$ à double laplacien nul ($\Delta^2 \phi(r, z) = 0$) ;
- d'autre part la résolution du problème de Burmister par une transformation de Henkel sur les variables de la fonction de tension.

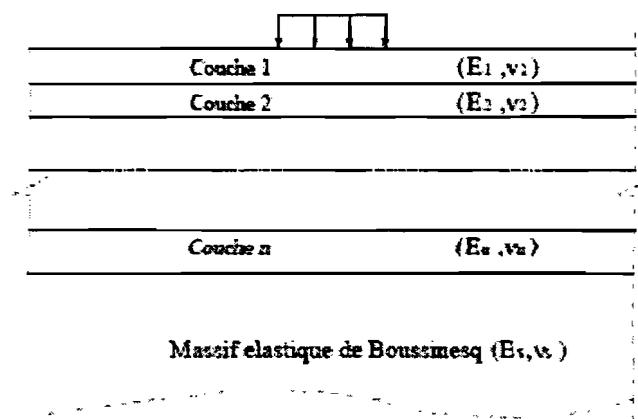


Figure III.14 : Schéma du modèle de Burmister

L'utilisation de l'outil informatique est indispensable à la résolution du problème : beaucoup de programmes de calcul permettent de le résoudre (Alizé 3 et 4, Écoroute, Bistro...). Par ailleurs, des abaques et tables de calcul ont été établis : nous citerons les abaques de Jeuffroy et Bachelez pour une tricouche composée d'une plaque reposant sur un massif de Burmister.

Conclusion

A voir toutes les méthodes ci-dessus présentées, le technicien peut être confronté à un embarras du choix. Pourtant si l'on adaptait le trafic, le contexte économique, la durée de vie de la chaussée et la nature des matériaux au contexte dans lequel la présente étude est réalisée, on se rendrait compte que plusieurs de ces méthodes ne nous satisferaient entièrement. C'est l'une des problématiques qui devrait, à défaut de disposer d'une méthode de dimensionnement sénégalaise, rendre impérative l'élaboration d'un catalogue national.

Toutefois, la méthode du CEBTP ayant été réalisée à la suite d'expérimentations sur des chaussées africaines, elle constitue jusqu'à présent un outil d'aide à la décision non moins négligeable pour les techniciens de la route.

IV. EXPOSE DE LA METHODE FRANCAISE DE DIMENSIONNEMENT

Les méthodes rationnelles de dimensionnement ayant beaucoup évolué ces dernières années, cette étude sera menée avec la méthode française de dimensionnement des chaussées neuves. Si besoin est, elle sera complétée par les méthodes empiriques notamment par la méthode du CEBTP.

IV.1. Les données requises pour le dimensionnement

Comme pour tout modèle de calcul, la méthode française requiert beaucoup de paramètres ou renseignements en entrées. Ceux-ci peuvent être classés en quatre grands groupes :

- le trafic ;
- les paramètres de base du calcul ;
- les conditions climatiques et environnementales ;
- les caractéristiques des matériaux.

IV.1.1. Le trafic

Il est essentiel, pour tout projet de construction routière, de déterminer le trafic devant emprunter la future infrastructure. Cela permet d'effectuer:

- dans un premier temps, le pré-dimensionnement (choix de la qualité des matériaux et du type de structure...);
- dans un second temps, l'analyse mécanique du comportement en fatigue de la chaussée.

IV.1.1.1. Les classes de trafic

La classe de trafic est déterminée par le trafic poids lourds, un poids lourd étant défini comme un « *véhicule de charge utile supérieure ou égale à 50 kN.* »[7]. Dans l'édition de 1998 du Catalogue des structures types de chaussées neuves, les poids lourds sont définis autrement : la norme NF P 98-082 définit les poids lourds comme des véhicules de plus de 35 kN de poids total autorisé en charge (PTAC). La conversion des poids « charge utile » en poids PTAC peut être effectuée selon la formule ci-dessous (formule valable uniquement en rase campagne) :

$$N_{PTAC} = 1.25 \times N_{CU}$$

N_{PTAC} : nombre de véhicules de poids total autorisé en charge supérieur à 35 kN

N_{CU} : nombre total de véhicules en charge utile supérieure à 50 kN

La classe de trafic est déterminée à partir du trafic poids lourds par sens compté en moyenne journalière annuelle (MJA) pour la voie la plus chargée à l'année de mise en service. Le tableau ci-dessous définit la répartition du trafic poids lourds par voie de circulation selon le type de chaussées et le nombre de voies.

Type de chaussée	Nombre de voies	Trafic poids lourds affecté
Chaussées unidirectionnelles	2x2 voies	90 % du trafic poids lourds sur la voie de droite
	2x3 voies	- 90 % du trafic poids lourds sur la voie de droite - 20 % du trafic poids lourds sur la voie médiane
Chaussées bidirectionnelles	Largeur < 5m	100 % du trafic poids lourds dans les deux sens
	5m < Largeur < 6m	75 % du trafic poids lourds dans les deux sens

Tableau IV.1. Répartition du trafic poids lourds par voie de circulation

Classe de trafic	LCPC	SETRA
1	10000	10000
2	10000 - 20000	10000 - 20000
3	20000 - 30000	20000 - 30000
4	30000 - 40000	30000 - 40000
5	40000 - 50000	40000 - 50000
6	50000 - 60000	50000 - 60000
7	60000 - 70000	60000 - 70000
8	70000 - 80000	70000 - 80000
9	80000 - 90000	80000 - 90000
10	90000 - 100000	90000 - 100000

Tableau IV.2. Classes de trafic LCPC-SETRA [7]

IV.1.1.2. Le trafic équivalent

Pour le dimensionnement, le trafic est caractérisé par le nombre équivalent d'essieux de référence NE . L'essieu de référence pour cette étude est celle de 13 tonnes (essieu standard utilisé au Sénégal).

$$NE = TC \times CAM$$

TC : nombre cumulé de poids lourds pour la période de calcul

CAM : coefficient d'agressivité moyenne des poids lourds par rapport à l'essieu de référence

- *Calcul du nombre total de poids lourds pour une période de calcul donnée*

$$TC = 365 \times MJA \times C$$

Si la classe de trafic est déterminée, on prend généralement, comme valeur pour la MJA, la moyenne géométrique des limites de la classe de trafic.

C : facteur de cumul sur la période de calcul

$$C = \frac{(1+t)^p - 1}{t}$$

p : période de calcul (durée de vie)

t : taux de croissance géométrique constant sur la période de calcul

• Détermination du coefficient d'agressivité moyenne

L'endommagement par fatigue d'une chaussée causé par un essieu dépend de plusieurs paramètres pouvant être très dispersés qui sont :

- la charge de l'essieu ;
- la configuration des essieux (isolé, tandem, tridem) ;
- la configuration des roues (simples, jumelées) ;
- le type de structure de chaussée et la nature des matériaux.

a. Agressivité d'un essieu

Elle correspond au dommage provoqué par un passage d'un essieu de charge P par rapport au dommage dû à un passage de l'essieu de référence P₀.

$$A = K \left(\frac{P}{P_0} \right)^\alpha$$

K : coefficient tenant compte du type d'essieu (simple, tandem ou tridem)

Types de structures	α	K		
		Essieu simple	Essieu tandem	Essieu tridem
Structures souples et bitumineuses	5	1	0,75	1,1
Structures semi-rigides	12	1	12	113
Structures en béton				
- dalles	12	1	12	113
- béton armé continu	12	1	5	5

Tableau IV.3. Valeurs de K et α pour le calcul de l'agressivité d'un essieu (structures neuves moyen et fort trafic) [7]

a. Agressivité d'un poids lourd

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

b. Agressivité d'un trafic (CAM)

Connaissant l'histogramme des charges par type d'essieu pour un trafic donné, l'agressivité d'un trafic est qualifiée par le CAM correspondant à l'agressivité moyenne des poids lourds composant le trafic par rapport à l'essieu pris pour référence. [7]

$$CAM = \frac{1}{NPL} \left[\sum_i \sum_{j=1}^3 K_j n_{ij} \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^\alpha \right]$$

NPL : nombre de poids lourds pendant la période de comptage

K_j : coefficient correspondant au type d'essieu

- $j = 1$ pour un essieu simple
- $j = 2$ pour un essieu tandem
- $j = 3$ pour un essieu tridem

n_{ij} : nombre d'essieux élémentaires de type j et de classe de charge i ,

En l'absence d'éléments suffisants, on pourra se référer pour la détermination du CAM au tableau suivant (valable pour la détermination du trafic cumulé équivalent NE et la justification vis-à-vis du comportement en fatigue des couches liées et vis-à-vis du risque d'ornièrage du sol-support ou des couches non liées) :

Chaussées à faible trafic	CAM	0.4	0.5	0.7	0.8
	Classe	T5	T4	T3-	T3+
Chaussées à trafic moyen et fort	CAM	0.8	1	1.3	
		Couches hydrocarbonées des structures mixtes et inverses	Chaussées bitumineuses d'épaisseur supérieure à 20 cm	Couches de matériaux traités aux liants hydrauliques et en béton de ciment	
		Couches hydrocarbonées d'épaisseur au plus égale à 20 cm des chaussées bitumineuses	Couches non liées et sols support		

Tableau IV.4. Coefficients d'agressivité selon le trafic et le type de chaussée [7]

IV.1.2. Les paramètres de base du calcul

La notion de durée de vie étant quelquefois très difficile à définir du fait du développement non homogène des dégradations et de la réalisation de travaux d'entretien sur l'infrastructure avant sa destruction complète, il est nécessaire d'introduire la notion de risque de calcul.

« Un risque de calcul de $x\%$ sur une période de p années pris pour le dimensionnement de la chaussée, c'est la probabilité qu'apparaissent au cours de ces p années des désordres qui impliqueraient des travaux de renforcement assimilables à une reconstruction de la chaussée, en l'absence de toute intervention d'entretien structurel dans l'intervalle. »[7] Dans un autre approche, on pourrait attribuer à la chaussée, une valeur structurale résiduelle correspondant à un niveau de dégradation admis après une durée donnée.

Matériaux	Classes de trafic			
	T0	T1	T2	T3
Grave bitume	2 %	5 %	12 %	25 %
Grave hydraulique	2.5 %	5 %	7.5 %	12 %

Tableau IV.5 : Risque de calcul retenu à 20 ans pour le Catalogue 1977 des chaussées des routes nationales [7]

IV.1.3. Les conditions climatiques et environnementales

Elles influencent le choix de la nature des liants hydrocarbonés et concernent principalement le régime pluviométrique et les cycles saisonniers et variations extrêmes de la température.

Le régime pluviométrique associé aux conditions de drainage et au profil géométrique (déblai ou remblai) influe sur l'état hydrique de la plate-forme de chaussée qui doit être pris en compte dans l'estimation de la portance de la PST aussi bien durant la réalisation de la chaussée que pour le dimensionnement.

Les cycles saisonniers de température peuvent d'une part avoir une grande incidence sur la déformabilité et la résistance des matériaux hydrocarbonés et d'autre part engendrer des sollicitations importantes dans les structures rigides.

IV.1.4. Les paramètres descriptifs de la plate-forme support de chaussée

Nous avons, dans la première partie, rappelé les principales fonctions que devrait remplir la plate-forme support de chaussée à *court terme* et à *long terme*.

La démarche classique veut que l'on détermine, pour le sol-support, le cas de PST en fonction de la nature du sol en place, de l'état hydrique et des conditions de drainage. A chaque cas de PST est associée une classe d'arase (Ari) définie par la portance à long terme de l'arase de terrassement.

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

Tableau IV.6 : Classe de portance à long terme au niveau de l'arase de la PST [7]

Si en outre, une couche de forme est disposée (dans le cas où les matériaux de remblai ou en place ne présentent pas les qualités requises), il faudra par la suite définir une classe de portance à long terme PFi à partir du couple PST-couche de forme

Pour le dimensionnement de la chaussée, on peut considérer deux scénarii :

- dans le cas d'une justification vis-à-vis du sol support, ce dernier est considéré comme un massif élastique caractérisé par un module d'Young égal à la borne inférieure de la classe d'arase de la PST et une valeur du coefficient de Poisson généralement égale à 0.35. Il faudra par ailleurs vérifier la déformation verticale du sol-support ;

- dans le cas d'une justification vis-à-vis du couple PST-couche de forme, il est affecté à la plateforme une valeur de module d'Young égale à la borne inférieure de la classe de portance PFi et une valeur de coefficient de Poisson. Il faudra par ailleurs vérifier la déformation verticale sous l'assise de chaussée.

Classe de plate-forme	Examen visuel essieu 13t	Indice portant CBR	Module de déformation à la plaque EV2 (MPa)	Module de réaction du sol K (daN/cm ²)	Type de sol
P ₀	Circulation impossible / sol inapte très déformable	CBR ≤ 3	EV2 ≤ 15	K ≤ 3	Argiles fines saturées faible densité sèche, sols contenant des matières organiques
P ₁	Inapte très déformable	3 < CBR ≤ 6	15 < EV2 ≤ 30	3 < K ≤ 5	Limons plastiques, argileux et argilo-sableux, argiles à silice, alluvions grossières etc. Très sensibles à l'eau
P ₂ ou PF1	Déformable	6 < CBR ≤ 10	30 < EV2 ≤ 50	5 < K ≤ 6	Sables alluvionnaires argileux ou fins limoneux, graviers argileux ou limoneux, sols marneux contenant moins de 36% de fines
P ₂ ou PF2	Peu déformable	10 < CBR ≤ 20	50 < EV2 ≤ 120	6 < K ≤ 7	Sables alluvionnaires propres avec fines < 5%, graviers argileux ou limoneux avec fines < 12%
P ₂ ou PF3	Très peu déformable	20 < CBR ≤ 50	120 < EV2 ≤ 250	7 < K ≤ 15	Matériaux insensibles à l'eau, sables et graviers propres, matériaux rocheux saints etc.
P _{ex} ou PF4		CBR > 50	EV2 > 250	K > 15	chaussées anciennes

Tableau IV.7 : Classe de portance à long terme des plate-formes

selon le Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic LCPC-SETRA, 1981 [9]

IV.1.5. Les caractéristiques des matériaux

Elles sont variables selon le type de matériaux et peuvent être divisées en deux grands groupes : les caractéristiques intrinsèques et les caractéristiques de mise en œuvre.

IV.1.5.1. Les graves non traitées (GNT)

Pour les GNT, leurs caractéristiques se limitent aux caractéristiques intrinsèques nécessaires à la représentation du comportement réversible sous une charge à savoir :

- le module d'Young E ;
- le coefficient de Poisson qui peut être pris égal à 0.35

Nous précisons que la rigidité des assises non traitées dépend de celle de la couche-support. Le module des graves non traitées est généralement de l'ordre de 3 à 4 fois celui de la couche-support.

IV.1.5.2. Les matériaux traités aux liants hydrauliques

- **Caractéristiques intrinsèques**

La prise n'étant pas instantanée pour ces matériaux, leurs caractéristiques mécaniques évoluent dans le temps. Elles devront donc être appréciées :

- d'une part dans le court terme vis-à-vis des premières sollicitations ;
- d'autre part à long terme à travers les « caractéristiques de résistance à un an ».

Pour la représentation du comportement réversible sous une charge, il est nécessaire de connaître :

- le module d'Young E ;
- le coefficient de Poisson qui est généralement pris égal à 0.25 pour ces matériaux.

Pour représenter le comportement en fatigue des matériaux traités aux liants hydrocarbonés, il faut disposer :

- des paramètres σ_6 et b de l'expression de la loi de fatigue :

$$\frac{\sigma}{\sigma_6} = \left(\frac{N}{10^6} \right)^b$$

- de l'écart-type SN de la distribution de $\log N$ à la rupture pour 10^6 cycles.

- **Caractéristiques de mise en œuvre**

Elles permettent, à travers l'écart-type Sh , de tenir compte de l'effet de dispersion sur l'épaisseur des couches à la mise en œuvre. On retient une valeur de $Sh = 3 \text{ cm}$

IV.1.5.3. Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés

- **Caractéristiques intrinsèques**

Pour ces matériaux, les caractéristiques mécaniques dépendent de la température et de la fréquence des sollicitations (généralement $f = 10\text{Hz}$).

Pour la représentation du comportement réversible sous une charge, il est nécessaire de connaître :

- le module d'Young E ;
- le coefficient de Poisson qui est généralement pris égal à 0.35 pour ces matériaux.

Pour représenter l'endommagement en fatigue des matériaux traités aux liants hydrocarbonés, il faut disposer :

- de la déformation ε_6
- de la pente b de l'expression de la loi de fatigue :

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

- de l'écart-type SN de la distribution de $\log N$ à la rupture pour 10^6 cycles.

- **Caractéristiques de mise en œuvre**

Elles sont caractérisées par l'écart-type sur l'épaisseur Sh qui peut être exprimé en fonction de l'épaisseur e de matériaux bitumineux.

e (cm)	$e \leq 10$	$10 < e < 15$	$15 \leq e$
Sh (cm)	1	$1 + 0.3(e-10)$	2.5

Tableau IV.9 : Écart-type sur les épaisseurs à la mise en œuvre de couches en matériaux bitumineux [7]

IV.2. Présentation de la démarche de dimensionnement

La méthode française de dimensionnement des structures de chaussée est basée sur :

- une analyse mécanique du fonctionnement de la structure ;

- les résultats d'essais de laboratoire sur l'endommagement par fatigue des matériaux ;
- les connaissances tirées de l'observation du comportement de chaussées réelles.

IV.2.1. Prédimensionnement

Il constitue la première étape et s'effectue après la collecte des données primaires au calcul. Il s'agira de :

- de choisir la couche de roulement ;
- de « prédimensionner » la structure par référence à des situations comparables.

IV.2.2. Calcul de la structure

Dans un second temps, on calcule les contraintes et les déformations pour le modèle mathématique de la chaussée « prédimensionnée », sous l'essieu de référence de 130 kN. L'essieu de référence est tel que chaque demi-essieu comporte un jumelage de roues simples, représenté par deux charges exerçant une pression uniformément répartie de 0.662 MPa sur deux disques de 0.125 m de rayon, avec un entraxe de 0.375 m.

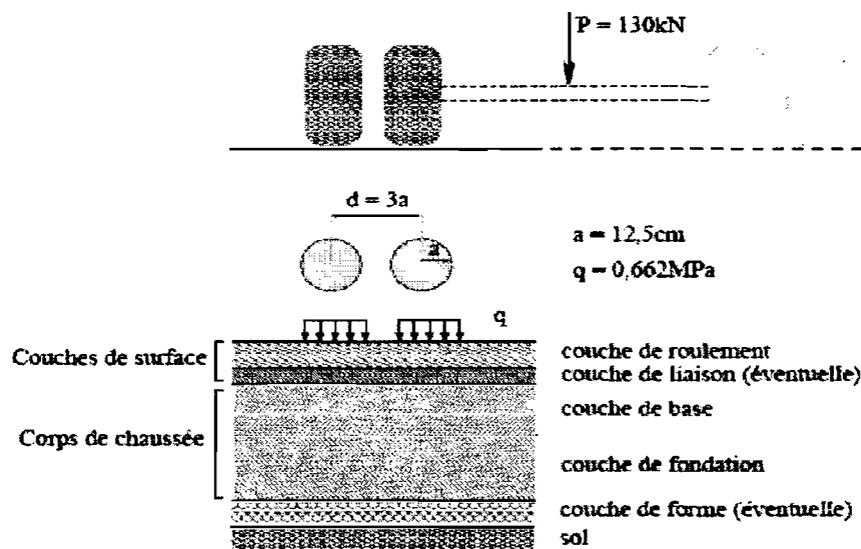


Figure IV.1 : Schématisation de la charge de référence pour le calcul des structures

IV.2.3. Vérification en fatigue de la structure et de la déformation du support

La phase de vérification consiste à comparer les contraintes et déformations calculées dans la deuxième étape aux valeurs admissibles déterminées en fonction :

- du trafic cumulé sur la période de calcul ;
- du risque de ruine admis sur cette période ;
- des caractéristiques de résistance en fatigue des matériaux ;
- des effets thermiques ;
- des données d'observation du comportement des chaussées de même type traduit par l'introduction d'un coefficient de calage k_c .

IV.2.4. Ajustement des épaisseurs calculées

Les épaisseurs préalablement calculées doivent être ajustées pour:

- tenir compte des contraintes technologiques d'épaisseurs minimale et maximale pour atteindre les objectifs de compacité et d'uni ;
- réduire les risques de défauts de liaison aux interfaces en limitant le nombre d'interfaces ;
- assurer une protection suffisante des assises traitées vis-à-vis des phénomènes non appréhendés (remontée de fissures en particulier) ;

IV.2.5. Définition de la coupe transversale

Les épaisseurs trouvées correspondant à celle du bord droit de la voie la plus chargée, il faut, dans un souci d'économie des coûts et d'utilisation rationnelle des matériaux nobles, réajuster les épaisseurs. Les variations transversales d'épaisseurs des couches sont fixées en fonction :

- du trafic par voie ;
- des caractéristiques géométriques du tracé ;
- du rattrapage des pentes transversales entre la plate-forme support de la chaussée et la couche de surface.

Par la suite il faudra définir les surlargeurs des différentes couches, les accotements et les dispositions constructives.

Remarque : il existe une étape concernant la vérification de la tenue au gel-dégel que nous avons ignorée parce qu'étant inadaptée à notre contexte climatique.

IV.3. Dimensionnement des différentes familles de structures

IV.3.1. Sol-support et couches non liées

IV.3.1.1. Sol-support

Pour toutes les structures, la vérification vis-à-vis de l'orniérage du sol support devra être effectuée. Les valeurs admissibles de la déformation verticale $\varepsilon_{v,ad}$ peuvent être calculées avec les formules ci-dessous :

- Pour les chaussées à moyen et fort trafic $T \geq T3$:

$$\varepsilon_{v,ad} = 0.012(NE)^{-0.222}$$

- Pour les chaussées à moyen et fort trafic $T < T3$:

$$\varepsilon_{v,ad} = 0.016(NE)^{-0.222}$$

Pour la justification de la déformation verticale du sol-support, le nombre équivalent d'essieux standards pourra être calculé en utilisant les valeur de CAM figurant dans le tableau suivant .

Classe	T5	T4	T3-	T3+	$\geq T2$
CAM	0.4	0.5	0.7	0.8	1

Tableau IV.10 : Valeurs du coefficient d'agressivité moyenne du trafic pour la justification de la tenue du sol support [7]

IV.3.1.2. Couches d'assise granulaire

Dans le cas des chaussées à faible trafic (trafic cumulé inférieur à 250 000 essieux standards), composées d'une couche de roulement de faible épaisseur sur une assise granulaire non traitée, il n'est pas introduit de critère de calcul sur le matériau d'assise. C'est par le choix des caractéristiques du matériau que l'on s'assure empiriquement d'une tenue acceptable de la grave non traitée vis-à-vis de l'orniérage.[7]

Pour les autres types de chaussées bitumineuses sur assise granulaire ou les chaussées à structure inverse, une vérification vis-à-vis de l'orniérage sera effectuée sur la couche granulaire non traitée selon les mêmes critères que pour le sol-support.

IV.3.2. Chaussées souples et bitumineuses épaisses

La structure est modélisée comme un système multicouches élastique avec collage aux interfaces. On distinguera, selon l'intensité du trafic, deux cas :

- **Cas des chaussées à faible trafic ($NE < 250\ 000$ essieux standards)**

Dans ce cas, la couche de roulement relativement mince peut être constituée :

- soit d'un enduit simple si $NE < 100\ 000$ essieux standards ;
- soit d'un béton bitumineux dont l'épaisseur peut être déterminée en fonction du trafic à l'aide de l'abaque ci-dessous :

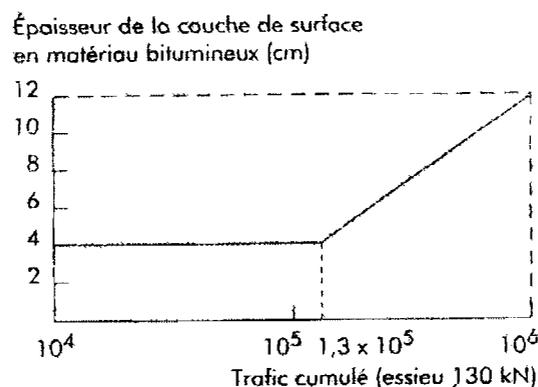


Figure IV.2 : Détermination des épaisseurs de la couche de surface en matériaux bitumineux [7]

L'épaisseur de la couche de base en GNT peut être fixée à :

- 15 cm si $NE < 100\ 000$ essieux standards
- 20 cm si $NE > 100\ 000$ essieux standards

La déformation verticale admissible limite $\varepsilon_{z,ad}$ sur le sol-support commande la détermination de l'épaisseur de la GNT.

- **Cas des autres chaussées souples ou bitumineuses épaisses**

Pour ces chaussées, si la fondation est en GRH, on pourra retenir les épaisseurs de matériau granulaire suivantes en fonction de la portance de la plateforme :

- 15 cm sur PF3
- 25 cm sur PF2
- 45 cm sur PF1

Le dimensionnement consiste à limiter à leur valeur admissible :

- l'allongement ε_t à la base des couches bitumineuses;

- la déformation verticale ε_z à la surface des couches non liées et du sol-support.

Détermination de l'allongement $\varepsilon_{t,ad}$ admissible à la base des couches bitumineuses

Elle est déterminée avec la formule suivante :

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) k_r k_c k_s$$

- $\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f)$: déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de NE cycles avec une probabilité de 50% pour la température équivalente θ_{eq} et à la fréquence caractéristique des sollicitations subies par la couche.

Étant donné que la loi de fatigue des matériaux bitumineux est représentée par une relation de la forme $\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) = \varepsilon_6(\theta_{eq}, f) \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b$ et que pour un climat tempéré ou à température positive l'influence de la température sur le comportement en fatigue peut être représentée par la relation $\varepsilon_6(\theta) E(\theta)^{0.5} = cte$, on peut écrire :

$$\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) = \varepsilon_6(10^\circ C, 25 Hz) \left[\frac{E(10^\circ C)}{E(\theta_{eq})} \right]^{0.5} \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b$$

La température de 10°C et la fréquence de 25 Hz constituent des valeurs usuelles pour établir la loi de comportement en fatigue des matériaux bitumineux. Si les conditions réelles s'écartent de ces valeurs, il faudra réajuster, à partir d'essais, les hypothèses ci-dessus citées.

- k_r : coefficient qui ajuste la valeur de la déformation admissible au risque de calcul retenu en fonction des facteurs de dispersion sur l'épaisseur (écart-type Sh) et sur les résultats des essais de fatigue (écart-type SN) :

$$k_r = 10^{-ub\delta}$$

u : variable centrée réduite associée au risque r

b : pente de la loi de fatigue du matériau (loi bi-logarithmique)

δ : écart-type de la distribution de $\log N$ à la rupture

$$\delta = \left[SN^2 + \left(\frac{c^2}{b^2} \right) Sh^2 \right]^{0.5}$$

c : coefficient reliant la variation de déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée, Δh , $\log \varepsilon = \log \varepsilon_0 - c \Delta h$. Pour les chaussées courantes, c est de l'ordre de 0.02 cm⁻¹.

- k_0 : coefficient de calage pour ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement observé des chaussées de même type

Matériau	k_0
Grave-bitume	1.3
Béton bitumineux	1.1
EME	1

Tableau IV.11 : Valeurs du coefficient k_0 pour les chaussées bitumineuses [7]

- k_1 : coefficient minorateur tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de portance d'une couche de faible portance supportant des couches liées.

Module*	$E < 30 \text{ MPa}$	$30 \text{ MPa} \leq E \leq 120 \text{ MPa}$	$120 \text{ MPa} \leq E$
k_1	1/1.2	1/1.1	1

Tableau IV.12 : Valeurs du coefficient k_1 [7]

* : le module à considérer est celui de la couche sous-jacente et non celui caractérisant la rigidité de la plateforme.

IV.3.3. Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

On différenciera le cas des chaussées comportant deux couches d'assise traitées de celui des assises n'en comportant qu'une seule.

- **Cas des chaussées comportant deux couches d'assise en MTLH**

Dans ce cas (fondation et base en MTLH), la chaussée est assimilée à une structure continue et est modélisée par un système multicouches élastiques. Selon la rigidité de la grave traitée, on pourra prendre en compte l'effet des discontinuités transversales avec le coefficient k_1 décrit dans la suite.

- **Cas des chaussées ne comportant qu'une seule couche en MTLH**

La modélisation de ces types de structure est quelques fois complexe du fait de l'apparition de fissures. Il se développe, au voisinage des fissurations, des sollicitations importantes sur le sol-support, qui peuvent être préjudiciables à la tenue de la chaussée. Une approche consiste à fixer une épaisseur minimale de 25 cm pour les matériaux de classe G2 et

G3 pour un trafic cumulé $NE \leq 10^6$. Dans le cas de chaussées à faible trafic cette épaisseur minimale peut être ramenée à 12 cm.

Pour les chaussées à assise aux MTLH, les conditions de liaison entre couches sont les suivantes :

- collées à l'interface couche de base – couche de roulement si la mise en œuvre est satisfaisante ;
- collées à l'interface fondation – support ;
- collées à l'interface base – fondation dans le cas d'une grave-laitier ;
- décollées à l'interface base – fondation dans la cas d'une grave-cendres volantes-chaux ;
- indéterminées dans le cas des autres liants. La nature de la liaison dépend fortement des conditions d'exécution. On pourra dans ces cas imposer comme valeur de contrainte à la base des couches, la demi-somme des valeurs trouvées avec les cas collé et décollé.

Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques sont vérifiées dans le dimensionnement vis-à-vis de :

- la rupture par fatigue des couches liées par une limitation de la contrainte de traction σ_t à leur base. La vérification s'effectue à la base de l'assise traitée s'il n'y a qu'une couche ou si les couches sont collées, sinon, à la base de chaque couche traitée ;
- l'orniérage du sol-support par une limitation de la déformation verticale ε_z à la surface des couches non liées et du sol-support.

Détermination de la contrainte de traction $\sigma_{t,ad}$ admissible à la base des couches traitées

Elle est déterminée avec la formule suivante :

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_{t,ad}(NE)k_r k_d k_c k_s$$

- $\sigma_t(NE)$: contrainte pour laquelle la rupture en flexion sur éprouvette de 360j est obtenue pour NE chargements.

La loi de fatigue des matériaux traités aux liants hydrauliques est représentée par une relation de la forme $\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 + \beta \log N$ mais elle peut être approchée par la formule suivante :

$$\sigma_t = AN^b$$

Pour $10^5 < NE < 10^7$, β et b sont liés par :

$$b = -0.5 \log \left(\frac{1+5\beta}{1+7\beta} \right)$$

Cette relation nous permet d'écrire que :

$$\sigma_t(NE) = (1+6\beta) \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b \sigma_0$$

Si l'on utilise la valeur de σ_6 , on pourra calculer la valeur par la formule suivante $\sigma_t(NE)$:

$$\sigma_t(NE) = \sigma_6 \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b$$

- k_r : coefficient qui ajuste la valeur de la déformation admissible au risque de calcul retenu en fonction des facteurs de dispersion sur l'épaisseur (écart-type Sh) et sur les résultats des essais de fatigue (écart-type SN) :

$$k_r = 10^{-ub\delta}$$

u : variable centrée réduite associée au risque r

b : pente de la loi de fatigue du matériau (loi bi-logarithmique)

δ : écart-type de la distribution de $\log N$ à la rupture

$$\delta = \left[SN^2 + \left(\frac{c^2}{b^2} \right) Sh^2 \right]^{0.5}$$

c : coefficient reliant la variation de déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée, Δh , $\log \varepsilon = \log \varepsilon_0 - c \Delta h$. Pour les chaussées courantes, c est de l'ordre de 0.02 cm^{-1} .

- k_d : coefficient introduit pour tenir compte de l'effet des discontinuités pour la couche de base :

- $k_d = 1/1.25$ pour les graves traitées de classe G4 ou G5 et pour le béton compacté
- $k_d = 1$ pour les graves traitées de classe G2 ou G3

- k_c : coefficient de calage pour ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement observé des chaussées de même type.

Matériau	k_c
Grave-ciment et graves-liants spéciaux routiers de classe G3	1.4
Autres MTLH	1.5

Tableau IV.13 : Valeurs du coefficient k_c pour chaussées en MTLH

* k_c : coefficient minorateur tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de portance d'une couche de faible portance supportant des couches liées.

Module*	$E < 50 \text{ MPa}$	$50 \text{ MPa} \leq E \leq 120 \text{ MPa}$	$120 \text{ MPa} \leq E$
k_s	1/1.2	1/1.1	1

Tableau IV.14 : Valeurs du coefficient k_s [7]

IV.3.4. Chaussées à structure mixte

Comme mentionné au chapitre I, les chaussées à structure mixte sont caractérisées par le rapport K de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale. Pour une durée de vie de 20 ans et avec une structure à couche de base en grave-bitume, K doit être de l'ordre de 0.5. En dessous- de cette valeur, la structure devra être calculée comme une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques.

Les structures mixtes sont modélisées comme un système multicouches élastiques. Il faudra cependant distinguer, dans l'évolution du comportement mécanique, deux phases :

- une première phase où les couches restent collées entre elles, les déformations sur les matériaux bitumineux sont faibles et la couche en MTLH est très sollicitée;
- une deuxième phase où l'endommagement par fatigue de la fondation, entraîne un glissement entre la couche de base en matériaux bitumineux et la fondation en MTLH. Dans cette configuration, le module de la fondation chute et on lui affecte une valeur résiduelle de l'ordre de $1/5^{\text{ème}}$ du module initial.

Les chaussées à structure mixte sont vérifiées dans le dimensionnement vis-à-vis de :

- la rupture par fatigue des couches bitumineuses par une limitation de l'allongement ϵ , à leur base ;
- la rupture par fatigue de la couche traitée aux liants hydrauliques par une limitation de la contrainte de traction σ , à sa base ,

- l'orniérage du sol-support par une limitation de la déformation verticale ε_s à sa surface.
- la valeur de K .

• *Détermination de la déformation $\varepsilon_{i,ad}$ admissible à la base des couches bitumineuses*

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\varepsilon_{i,ad} = \varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) k_1 k_c$$

Les définitions de $\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f)$, k_1 et k_c sont similaires à celles données pour les chaussées souples et bitumineuses épaisses.

Remarque : La valeur de NE est obtenue en prenant pour la couche bitumineuse une valeur de $CAM = 0,8$.

• *Détermination de la contrainte de traction $\sigma_{i,ad}$ admissible à la base des couches traitées aux liants hydrauliques*

Elle est donnée par la formule suivante .

$$\sigma_{i,ad} = \sigma_t(NE) k_1 k_2 k_3$$

Les définitions de $\sigma_t(NE)$, k_1 , k_2 et k_3 sont similaires à celles données pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.

Remarque : La valeur de NE est obtenue en prenant pour la couche traitée aux liants hydrauliques une valeur de $CAM = 1,3$.

• *Choix du risque de calcul pour les chaussées à structure mixte*

- Pour la couche bitumineuse, le risque de calcul $r1$ est égal à la valeur que l'on aurait choisie pour une structure bitumineuse.
- Pour la couche traitée, le risque de calcul $r2$ prend une valeur supérieure à celle que l'on aurait choisie pour une structure à assise traitée aux liants hydrauliques. Le tableau suivant donne les valeurs du risque $r2$:

Classe	T0	T1	T2	T3
Risque $r2$ (%)	3	10	20	35

Tableau IV.15 : Valeurs du risque de calcul $r2$ pour la couche en MTLH [7]

Conclusion :

La méthode française est très utilisée au Sénégal pour le dimensionnement des chaussées. Les paramètres utilisés en entrée, même s'ils sont nombreux et quelquefois complexes à déterminer parce que nécessitant beaucoup d'expérimentations sur le comportement des matériaux, l'évolution du trafic et sa composition, pourront être adaptés à notre contexte par des similitudes ou des interpolations.

Par ailleurs, nous remarquerons que le terme « latérites » ne figure pas dans le guide de dimensionnement français alors que les graveleux latéritiques sont les matériaux les plus utilisés au Sénégal. On parle plus chez les français de GNT et graves-ciment. Pour le cas des graveleux latéritiques traités au ciment, leurs caractéristiques intrinsèques (module d'Young variant de 1000 à 5000 MPa) et de fatigue (pente de la droite de fatigue b , contrainte de rupture à 10^6 cycles σ_c) sont très différentes de celles des graves ciment (module d'Young variant de 20000 à 30000 MPa). Par conséquent, les performances mécaniques des graveleux latéritiques traités au ciment ne sont pas identiques à celles des graves-ciment.

La méthode demeure applicable au dimensionnement des structures de chaussée au Sénégal. Ainsi, nous tenterons, à travers une bonne recherche documentaire, de déterminer l'ensemble des paramètres d'entrées nécessaires à son utilisation dans le cadre l'élaboration du catalogue.

V. ELABORATION DU CATALOGUE SENEGALAIS

V.1. Les données d'entrées de base

V.1.1. La durée de vie

Dans la méthode du CEBTP, la durée de vie des chaussées était de 15 ans, valeur qui peut s'avérer insuffisante. La durée de vie peut être fixée selon les options suivantes :

- entretiens fréquents et légers : durée de vie courte ;
- entretiens espacés et lourds : durée de vie longue.

Nous retiendrons pour cette étude une durée de vie de 20 ans, valeur qui nous semble satisfaire aussi bien aux contraintes d'investissement initial (coût de construction) qu'à ceux d'investissement à long terme (coût d'entretien et d'exploitation).

V.1.2. Le trafic

Pour rester dans la continuité des travaux de nos prédécesseurs, nous travaillerons dans cette étude avec les classes de trafic du projet de fin d'études de Mr Ousmane MBODJI en y ajoutant une classe T6 pour les MJA supérieurs à 3600 PL/jour. Les bornes supérieures et inférieures de chaque classe de trafic sont représentées dans le tableau V.1 :

Classe de trafic	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
			T2-	T2+	T3-	T3+	T4-	T4+	T5-	T5+	T6-	T6+
MJA	0	90	160	300	500	900	1200	1800	2400	3600	5100	8000

Tableau V.1: Classe de trafic définies pour l'étude

Nous avons par la suite, pour identifier des plages d'équivalences, essayé de superposer à la classe de l'étude les autres classe de trafic rencontrées dans nos recherches documentaires (classes CEBTP et classes LCPC-SETRA). La détermination des correspondances entre classes nous permet d'adapter ou d'actualiser les données relatives aux matériaux par rapport à ce projet.

MJA	0			120			400			1200	2400	4000	
CLASSE CEBTP		T1			T2			T3			T4	T5	
MJA	0	90	160	300	500	900	1200	1800	2400	3600	5100	8000	
CLASSE ETUDE		T1		T2-	T2+	T3-	T3+	T4-	T4+	T5-	T5+	T6-	T6+
CLASSE LCPC-SETRA	T5	T4	T3-	T3+	T2-	T2+	T1-	T1+	T0-	T0+	T5	TEX	
MJA	0	25	30	85	130	200	300	500	750	1200	2000	3000	5000

Tableau V.2 : Équivalence entre les différentes classes de trafic

V.1.3. Valeurs du CAM

Pour définir les valeurs du CAM pour l'étude, nous avons synthétisé les valeurs figurant dans le tableau IV.5 (valeurs du CAM selon le trafic et le type de chaussées) et le tableau IV.10 (valeurs du CAM pour la justification du sol-support). Nous obtenons ainsi le tableau suivant :

Type de structure		Valeur du CAM pour le dimensionnement		
		T1	T2	≥T2
Sol-support		0.8	0.8	1
Structure souple		0.8	0.8	1
Structure semi-rigide				1.3
Structure mixte	Couche bitumineuse	-	-	0.8
	Couche en MTLH	-	-	1.3
Structure inverse	Couche bitumineuse	-	-	0.8
	Couche en MTLH	-	-	1.3

Tableau V.3 : Valeurs du CAM pour le dimensionnement des structures du catalogue

Pour la détermination des classes de trafic cumulé, nous résumons ci-dessous les valeurs du CAM utilisées :

Type de structures	CAM
Souples	0.8
Semi-rigides	1.3
Mixtes	1.2
Inverses	0.8

Tableau V.4 : Valeurs du CAM pour la définition des classes de trafic cumulé

V.1.4. Taux de croissance annuel du trafic des poids lourds

Dans les projets de fin d'études précédents, il a été supposé un taux de croissance de 7%. Si on analyse les résultats des dernières campagnes de comptage routier notamment celle de 2002, on se rend compte que cette valeur peut, pour beaucoup de tronçons routiers, être excessive. Entre 1996 et 2002, le taux de croissance annuel du trafic moyen journalier est de 1.02%. Toutefois, nous noterons que sur certaines stations de comptage, le taux de croissance dépasse très largement cette moyenne.

Pour lever cette incertitude, nous choisirons dans cette étude, un taux de croissance annuel géométrique constant sur la période de calcul de 5%.

Connaissant la période de calcul p , les valeurs de MJA par classe de trafic, le taux de croissance annuel i et les valeurs du CAM, nous calculerons les nombres d'essieux équivalents pour chaque classes de trafic cumulé TC ainsi que les bornes supérieures de ces dernières.

		Classes de trafic (valeurs moyennes du MJA)					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
		90	160	500	1200	2400	6100
		Classes de trafic cumulé (en millions d'essieux équivalents)					
	CAM	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6
Structure souple	0.8	0.87	1.54	4.83	11.59	23.17	49.24
Structure semi-rigide	1.3	1.41	2.51	7.84	18.83	37.66	80.02
Structure mixte	1.2	1.30	2.32	7.24	17.38	34.76	73.86
Structure inverse	0.8	0.87	1.54	4.83	11.59	23.17	49.24

Tableau V.5 : Nombre d'essieux équivalents NE utilisées pour l'élaboration du catalogue

		Bornes supérieures des classes de trafic (MJA)					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
		90	300	900	1800	3600	8000
		Bornes supérieures des classes de trafic cumulé (en millions d'essieux équivalents)					
	CAM	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6
Structure souple	0.8	0.87	2.90	8.69	17.38	34.76	77.24
Structure semi-rigide	1.3	1.41	4.71	14.12	28.24	56.48	125.52
Structure mixte	1.2	1.30	4.34	13.03	26.07	52.14	115.86
Structure inverse	0.8	0.87	2.90	8.69	17.38	34.76	77.24

Tableau V.6 : Bornes supérieures des classe de trafic cumulé (en millions d'essieux équivalents NE)

V.1.5. Les caractéristiques de la plate-forme support de chaussée

Nous ne retiendrons pour l'étude que quatre des cinq classes de plate-forme définies par le CEBTP : S2, S3, S4 et S5. Pour la classe S5, les bornes inférieure et supérieure définies par CEBTP sont respectivement 30 et 80. Dans notre étude, cette classe à pour bornes 30 et 60.

Le module d'Young des sols de plateforme pourra être estimé en fonction du CBR par la relation suivante :

$$E = 5 \times CBR \quad (\text{en MPa})$$

Les modules de calcul pour chaque classe de plateforme sont mentionnés dans le tableau ci-dessous (le CBR de calcul étant pris égal à la moyenne arithmétique des bornes supérieure et inférieure) :

CBR	5 < CBR < 10	10 < CBR < 15	15 < CBR < 30	30 < CBR < 60
Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5
CBR de calcul	7.5	12.5	22.5	45
Module de calcul (MPa)	37.5	62.5	112.5	225

Tableau V.7 : Modules de calcul décrits de la plateforme support de chaussée

La déformation admissible du sol-support sera calculée par la loi de tassement Shell :

$$\varepsilon_{\text{ad}} = 0.028 \times (NE)^{-0.22} \quad \text{en mm}$$

La contrainte admissible du sol-support sera calculée par la formule de Kerkoven et Dormon :

$$\sigma_{\text{ad}} = \frac{0.3 \times CBR}{1 + 0.7 \times \log NE} \quad \text{en bars}$$

Remarque : Ces formules restent valables pour le calcul des contraintes et déformations admissibles des matériaux granulaires.

V.1.6. Les conditions climatiques

Les caractéristiques intrinsèques des matériaux bitumineux disponibles dans la documentation (française en majorité) sont définies généralement pour des températures équivalentes de l'ordre de 10 ou 15°C. Or, au Sénégal nous retrouvons généralement des températures qui, non seulement sont plus élevées, mais varient beaucoup sur l'année. De ce point de vue, les caractéristiques mécaniques (module d'Young, coefficient de Poisson et

déformation admissible) considérées seront celles correspondant à une température équivalente θ_{eq} de 30°C. Par définition : « la température équivalente est telle que la somme des dommages subis par la chaussée pendant une année, pour une distribution de température donnée, est égale au dommage que subirait la chaussée soumise au même trafic mais pour une température constante θ_{eq} » [7]

V.1.7. Les caractéristiques mécaniques des matériaux

Type de matériaux	CBR de calcul	E (MPa)	ν
SN	30	150	0.36
GN	60	300	0.36
GNT	80	400	0.35
GRH	100	600	0.35
LAT	Fondation	30	0.35
	Base	60	
LACo	100	600	0.35
Banco-coquillage**	-	-	0.35

Tableau V.8 : Caractéristiques mécaniques des matériaux non traités

** : données incomplètes

Type de matériaux	E (MPa) (10°C, 10Hz)	E (MPa) (30°C, 10Hz)	ν	σ_c , 10s (30°C, 25Hz)	-1/s	SN	Sh (m)	k_0
GB	12 300	2 700	0.45	80	5	0.3	*	1.3
GE	12 300	2 700	0.45	80	5	0.3	*	1.3
SE**	-	400	0.45	100	5	0.25	*	1.3
ED	7 200	1 300	0.45	100	5	0.25	0.01	1.1
BE	7 200	1 300	0.45	100	5	0.25	0.01	1.1
SA**	-	-	0.45	-	5	0.25	0.01	1.1

Tableau V.9 : Caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux

* : on se réfère au tableau IV.9

** : données incomplètes

Type de matériaux	E (MPa)	ν	m_s (MPa)	-1/b	SN	Sh (m)	k_0	k_a
Grave-ciment	20 000	0.25	0.75	15	1	0.03	1.4	1
Sable-ciment**	12 000	0.25	0.50	12	0.8	0.025	1.5	1
Latérite-ciment	1 200	0.25	0.42	10.9	0.7	0.025	1.5	1
Banco-ciment**	-	0.25	-	-	-	-	-	-

Tableau V.10 : Caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques

** : données incomplètes

V.1.8. Choix de la couche de roulement

Le Sénégal n'étant pas producteur de produits pétroliers, la fonction d'économie des coûts doit être intégrée dans le choix de la couche de roulement. Cela devrait normalement nous amener à utiliser dans les limites du possible (chaussées à faibles trafic) des enduits superficiels même si leur apport structurel est négligeable voire nul (les enduits superficiels ont plus une fonction d'usure et d'étanchéité). Seulement, les orientations politiques actuelles privilégient l'utilisation des enrobés en couche de roulement ; ce qui nous a conduit à opter pour un revêtement en béton bitumineux d'épaisseur économique. Les bétons bitumineux ont un apport structurel non négligeable. « A titre d'exemple, d'après les coefficients d'équivalence d'AASHTO, un centimètre de béton bitumineux (coefficient égal à 0.42) permettrait de diminuer l'épaisseur de la couche de base en GNT concassée (coefficient égal à 0.14) de 3 cm »[17].

Le tableau ci-dessous présente, selon le trafic, les épaisseurs requises pour les différents types de revêtement :

Type de revêtement	Épaisseurs requises selon la classe de trafic					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Béton bitumineux	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm	7 cm	8 cm
Enrobés denses	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm	7 cm	8 cm

Tableau V.11 : Type et épaisseur de la couche de roulement selon le trafic

V.1.9. Épaisseurs minimales et maximales de mise en œuvre des matériaux

Les épaisseurs nominales de mise en œuvre dépendent grandement des moyens techniques utilisés. Pour réaliser des épaisseurs de 35 cm en une seule couche, il faudrait disposer d'engins de compactage adaptés.

Matériaux	SN/SE	GN/GNT/GRH	LAT / LAC _o	COQ/COQC	GB	LAC
Mini	20	15	15	15	8	15
Max	35	35	35	35	15	25

Tableau V.12 : Épaisseurs minimales et maximales de mise en œuvre

V.1.10. Liaison aux interfaces

Nous supposerons, dans nos calculs, que toutes les couches sont collées. Dans le cas d'une superposition de deux couches de matériaux dont les caractéristiques n'assurent pas un collage à l'interface, on devra à l'exécution, mettre en œuvre une couche d'accrochage.

V.2. Les scénarios de structures

Ils ont été établis en tenant compte des performances mécaniques des matériaux, des critères économiques et technologiques. Nous n'avons pu utiliser tous les matériaux listés dans le chapitre III dans l'élaboration des scénarios de structure, les raisons sont évoquées ci-après :

- **graves-ciment et sables-ciment** : le contexte géologique français étant très différent du nôtre, il serait très difficile de trouver des matériaux pouvant atteindre des modules de 20000 MPa pour la grave-ciment et 12 000 MPa pour le sable-ciment. Les sables locaux sont très fins et ne peuvent donc pas offrir de très bonnes performances mécaniques.
- **sois-ciment** : insuffisance des données.
- **sables-bitume** : insuffisance des données.
- **banco-coquillage** : insuffisance des données
- **banco-ciment** : insuffisance des données

V.2.1. Les chaussées souples

Fondation		Base		Code de la structure	
Matériau	Code	Matériau	Code		
Sable naturel***	GN	Sable-bitume	SB	SN/SB	S1
Sable naturel	SN	Grave naturelle	GN	SN/GN	S2
Seble naturel	SN	Graveleux latéritiques crus 2	LAT2	SN/LAT2	S3
Sable naturel	SN	Graveleux latéritiques améliorés	LACo	SN/LACo	S4
Sable naturel	SN	Grave non traitée	GNT	SN/GNT	S5
Sable naturel	SN	Grave reconstituée humide	GRH	SN/GRH	S6
Graveleux latéritiques crus 1	LAT1	Graveleux latéritiques crus 2	LAT2	LAT1/LAT2	S7
Graveleux latéritiques crus 1	LAT1	Grave naturelle	GN	LAT1/GN	S8
Graveleux latéritiques crus 1	LAT1	Grave non traitée	GNT	LAT1/GNT	S9
Graveleux latéritiques crus 1	LAT1	Graveleux latéritiques améliorés aux concassés	LACo	LAT1/LACo	S10
Graveleux latéritiques crus 1	LAT1	Grave reconstituée humide	GRH	LAT1/GRH	S11
Graveleux latéritiques crus 2	LAT2	Grave-bitume	GB	LAT2/GB	S12
Grave naturelle	GN	Grave naturelle	GN	GN/GN	S13
Grave naturelle	GN	Graveleux latéritiques crus 2	LAT2	GN/LAT2	S14
Grave naturelle	GN	Graveleux latéritiques améliorés	LACo	GN/LACo	S15
Grave naturelle	GN	Grave non traitée	GNT	GN/GNT	S16
Grave naturelle	GN	Grave reconstituée humide	GRH	GN/GRH	S17
Grave naturelle***	GN	Grave-bitume	GB	GN/GB	S18
Grave non traitée	GNT	Grave non traitée	GNT	GNT/GNT	S19
Grave non traitée	GNT	Graveleux latéritiques crus 2	LAT2	GNT/LAT2	S20
Grave non traitée	GNT	Graveleux latéritiques améliorés	LACo	GNT/LACo	S21
Grave non traitée	GNT	Grave reconstituée humide	GRH	GNT/GRH	S22
Grave reconstituée humide	GRH	Grave reconstituée humide	GRH	GRH/GRH	S23
Grave reconstituée humide	GRH	Graveleux latéritiques améliorés aux concassés	LACo	GRH/LACo	S24
Graveleux latéritiques améliorés aux concassés	LACo	Graveleux latéritiques améliorés aux concassés	LACo	LACo/LACo	S25
Graveleux latéritiques améliorés aux concassés	LACo	Grave-bitume	GB	LACo/GB	S26
Banco-coquillage***	COO	Banco-coquillage	COO	COO/COO	S27

Tableau V.13. Scénari de structures pour chaussées souples

*** : non calculée

V.2.2. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Fondation		Base		Code de la structure	
Matériaux	Code	Matériau	Code		
Assise à deux couches traitées aux liants hydrauliques					
Sols-ciment***	SC	Graveleux latéritiques-ciment	LAC	SC/LAC	H1
Graveleux latéritiques-ciment	LAC	Graveleux latéritiques-ciment	LAC	LAC/LAC	H2
Banco-ciment**	COQC	Banco-ciment	COQC	COQC/COQC	H3
Assise à une couche traitée aux liants hydrauliques					
Graveleux latéritiques crus 1	LAT1	Graveleux latéritiques-ciment	LAC	LAT1/LAC	H4
Grav. naturelle	GN	Graveleux latéritiques-ciment	LAC	GN/LAC	H5
Grave non traitée	GNT	Graveleux latéritiques-ciment	LAC	GNT/LAC	H6
Grave reconstituée humide	GRH	Graveleux latéritiques-ciment	LAC	GRH/LAC	H7
Graveleux latéritiques améliorés aux concassés	LACo	Graveleux latéritiques-ciment	LAC	LACo/LAC	H8
Banco-coquillage***	COQ	Banco-ciment	COQC	COQ/COQC	H9

Tableau V.14 : Scénari de structures pour chaussées semi-rigides

*** : non calculée

V.2.3. Les chaussées à structure mixte

Fondation		Base		Code de la structure	
Matériaux	Code	Matériau	Code		
Sol-ciment ***	SC	Grave-bitume	GB	SC/GB	M1
Graveleux latéritiques-ciment	LAC	Grave-bitume	GB	LAC/GB	M2
Banco-ciment ***	COQC	Grave-bitume	GB	COQC/GB	M3

Tableau V.15 : Scénari de structures pour chaussées à structures mixtes

* : non calculée

V.3. Structure du catalogue

La structure du catalogue est assez simplifiée. Elle comportera dans sa version définitive trois parties principales : une notice d'utilisation (qui correspond globalement au présent chapitre), des fiches de matériaux et des fiches de structures.

Remarque : La structure du catalogue pourra être différente de celle adoptée dans la rédaction du PFE mais tous les éléments devant figurer dans la version utilisable du catalogue seront

présents dans le PFE. Dans ce cadre, le présent chapitre du mémoire devrait constituer la notice d'utilisation du catalogue.

V.3.1. La notice d'utilisation

Elle devra :

- d'une part informer sur la démarche et les hypothèses adoptées (ci-dessus détaillées) pour le calcul des structures ;
- d'autre part servir de guide d'emploi pour l'utilisateur. Elle pourrait, à cet effet, contenir des exemples traités pour chaque scénario de structure.

V.3.2. Les fiches de structures [cf. Annexes B]

Elles constituent la finalité de cette étude et formeront l'ossature du catalogue. Les fiches de structure seront présentées sous forme de tableau. Les six classes de trafic figureront en ordonnées (verticalement) et les quatre classes de plate-forme en abscisse (verticalement). Il suffira donc de croiser la classe de trafic et la classe de plate-forme pour trouver la structure correspondante. Un profil en travers type sera aussi matérialisé sur chaque fiche de structure.

V.3.3. Les fiches de matériaux [cf. Annexes A]

Elles sont divisées en deux parties:

- une partie servant à décrire les spécifications techniques auxquelles devront répondre les matériaux utilisables en techniques routières. Elles présentent donc les valeurs de grandeurs ou essais standards, les fuseaux granulométriques normalisés et toute autre spécification permettant de caractériser les matériaux ;
- une seconde partie définissant les hypothèses de dimensionnement propres à chaque matériau ainsi que les limites admissibles des contraintes et déformations.

V.4. Estimations des coûts et optimisation des solutions

Le catalogue ayant adopté plusieurs scénarios de structures, le concepteur peut faire un choix multiple de structures s'adaptant à l'environnement du projet. L'aspect économique entre ainsi en ligne de compte sur l'étude de projet et devra intégrer les contraintes liées aux finances (budget limité) ou à la disponibilité et à la mise en œuvre des matériaux. Un projeteur peut donc être amené se poser les questions suivantes :

- devrait-on choisir une structure utilisant des matériaux de qualité moindre mais disponibles dans l'environnement proche du projet ? Ce choix imposant sûrement des épaisseurs plus importantes et par conséquent une rallonge sur les temps d'exécution.
- devrait-on choisir une structure utilisant des matériaux de bonne qualité mais disponibles dans une zone nécessitant des moments de transport importants susceptibles de créer un surcoût sur le projet ?
- devrait-on choisir un revêtement en enduit superficiel m'obligeant à réaliser une couche d'entretien en enrobés dix ans après la mise en service ou devrais-je plutôt choisir un béton bitumineux capable de bien se comporter sur toute la durée de vie de la chaussée ?

Il apparaît donc nécessaire d'associer au catalogue, une bibliothèque, aussi sommaire qu'elle soit, capable d'orienter le concepteur sur l'estimation des coûts de chaque scénario de structure. La bibliothèque des prix pourra être définie après synthèse des coûts d'exécution enregistrés sur des projets routiers similaires et dans des zones différentes pour tenir compte des facteurs d'éloignement.

V.5. Exemple d'utilisation du catalogue

Nous allons essayer à travers une petite application d'utiliser les fiches de structures du catalogue.

Énoncé : Construction d'une autoroute 2x2 voies pour une durée de vie de 20 ans. Le trafic total dans les deux sens de circulation est de 8000 veh/j à la mise en service en 2007. Le pourcentage de poids lourds est de 15 %. Le taux de croissance du trafic sera considéré comme géométrique et égal à 5 % pour les dix premières années et 2 % pour les dix dernières. La plateforme a un CBR de 12 (classe de plateforme S3).

Résolution :

- **Détermination des trafics poids lourds**

$$TPL_{2007} = 8000 \times 0.5 \times 0.15 \times 0.9$$

$$TPL_{2007} = 540 \text{ PL/jour/sens}$$

$$TPL_{2017} = TPL_{2007}(1+t_1)^n = 540 \times (1+0.05)^{10}$$

$$TPL_{2017} = 880 \text{ PL/jour/sens}$$

• **Détermination du nombre total de poids lourds**

$$NPL_1 = 365 \times TPL_{2017} \times \frac{(1+i_1)^n - 1}{i_1} = 540 \times \frac{(1+0.05)^{10} - 1}{0.05}$$

$$NPL_1 = 2\,790\,102 \text{ PL}$$

$$NPL_2 = 365 \times TPL_{2017} \times \frac{(1+i_2)^n - 1}{i_2} = 880 \times \frac{(1+0.02)^{10} - 1}{0.02}$$

$$NPL_2 = 3\,517\,050 \text{ PL}$$

$$NPL = NPL_1 + NPL_2 = 2\,790\,102 + 3\,517\,050$$

$$NPL = 5\,990\,152 \text{ PL}$$

V.5.1. Choix d'une chaussée souple

Pour ces structures, le coefficient d'agressivité moyenne du trafic est $CAM = 0.8$. Le nombre d'essieux équivalents est donc :

$$NE = CAM \times NPL = 5\,990\,152 \times 0.8$$

$$NE = 4\,792\,122 \text{ essieux équivalents}$$

Ce qui correspond à une classe de trafic cumulé TC3. Plusieurs types de structures satisfieraient à cette classe mais nous optons pour une structure LAT1 / LACo (couche de fondation en latérite crue et couche de base en latérite améliorée aux concassés crue. [cf. fiche de structures S10]). Pour une classe de plateforme S3, la constitution de la chaussée est :



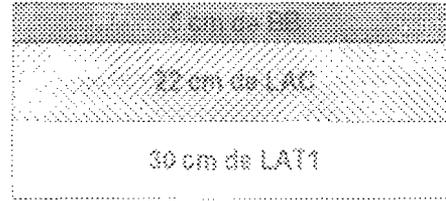
V.5.2. Choix d'une chaussée semi-rigide

Pour ces structures, le coefficient d'agressivité moyenne du trafic est $CAM = 1.3$. Le nombre d'essieux équivalents est donc :

$$NE = CAM \times NPL = 5\,990\,152 \times 1,3$$

$$NE = 7\,787\,198 \text{ essieux équivalents}$$

Ce qui correspond à une classe de trafic cumulé TC3. Plusieurs types de structures satisfieraient à cette classe mais nous optons pour une structure LAT1 / LAC (couche de fondation en latérite crue de CBR > 30 et couche de base en latérite-ciment). [cf. fiche de structures H4]. Pour une classe de plateforme S3, la constitution de la chaussée est :



V.5.3. Choix d'une chaussée à structure mixte

Pour ces structures, le coefficient d'agressivité moyenne du trafic est $CAM = 1,2$. Le nombre d'essieux équivalents est donc :

$$NE = CAM \times NPL = 5\,990\,152 \times 1,2$$

$$NE = 7\,188\,183 \text{ essieux équivalents}$$

Ce qui correspond à une classe de trafic cumulé TC3. Plusieurs types de structures satisfieraient à cette classe mais nous optons pour une structure LAC / GB (couche de fondation en latérite-ciment et couche de base en grave-bitume). [cf. fiche de structures M2]. Pour une classe de plateforme S3, la constitution de la chaussée est :



Synthèse des résultats : La chaussée souple semble être la plus adaptée à cette étude. Ces épaisseurs de matériaux sont quasiment égales à celle de la structure semi-rigide qui nécessite l'emploi du ciment qui est très coûteux. Par ailleurs, elle consomme moins de matériaux bitumineux que la structure mixte qui comporte en plus du revêtement une couche de grave-bitume de 10 cm.

Conclusion :

La définition des hypothèses de dimensionnement est une phase plus qu'importante dans l'élaboration du catalogue. Elle n'a pas été facile puisque certains matériaux sont encore insuffisamment caractérisés. De ce fait, nous avons été contraints d'ignorer dans le calcul les sables-bitume, les sols-ciment et les banco-coquillage.

Néanmoins, il a été possible de dimensionner 31 types de structures parmi lesquelles se trouvent les plus fréquemment rencontrées au Sénégal à savoir les chaussées souples de type LAT1/LAT2, les chaussées semi-rigides de type LAT1/LAC et les chaussées mixtes de type LAC/GB.

CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette étude, nous avons pu concevoir, un catalogue comportant des fiches de matériaux et des fiches de structures. Les fiches ont été élaborées en fonction des types de matériaux disponibles au Sénégal, de leurs performances mécaniques et de leurs aptitudes à être utilisés en technique routière, des caractéristiques du trafic, des contextes technique et économique.

Nous avons essayé, autant que possible, de réduire l'épaisseur des matériaux bitumineux étant donné que le Sénégal importe les produits pétroliers mais aussi, celle des matériaux traités aux liants hydrauliques du fait de la flambée des prix du ciment. Les calculs ont révélé que, selon les classes de trafic, certaines structures étaient plus avantageuses ou plus économiques que d'autres.

Pour les classes de trafic T1, T2 voire T3, les chaussées souples à assise en matériaux naturels conviendraient parfaitement. L'assise peut être constituée deux couches en grave au besoin, ou d'une couche de fondation en sable naturel et d'une couche de base en grave. L'épaisseur du revêtement varie entre 3 et 5 cm et celle de l'assise entre 15 et 65 cm selon la nature des matériaux et la classe de plateforme.

Pour les trafics T4, T5 et T6, les structures à assise traitée aux liants hydrauliques, les structures mixtes ainsi que certaines structures souples conviennent mieux. L'épaisseur du revêtement varie entre 6 et 8 cm.

Pour les structures semi-rigides, l'assise a une épaisseur totale variant entre 20 et 75 cm selon qu'elle est constituée d'une ou de deux couches en matériaux traités aux liants hydrauliques, selon la nature des matériaux et la classe de plateforme.

La structure mixte LAC/GB convient aussi pour cette fourchette de trafic : l'épaisseur de la couche de base varie entre 8 et 15 cm et celle de la couche de fondation entre 15 cm et 35 cm. Toutefois, cette solution entre en concurrence avec les structures semi-rigides du type LAC/LAC.

La structure souple avec couche en base en grave-bitume et couche de fondation en matériaux granulaires (LAT2 ou GNT, GRH ou LACo) est très peu économique pour les trafics allant de T4 à T6 : l'épaisseur de la couche de base varie entre 18 et 24 cm et celle de la couche de fondation 22 cm et 45 cm.

En regardant les objectifs initialement énoncés dans la fiche de présentation du sujet, on peut supposer avoir atteint ceux qui étaient à notre portée. La validation du catalogue par la réalisation de planches expérimentales ainsi que le suivi et l'évaluation du comportement des chaussées dépassent à notre avis le cadre de l'École ou celui d'un projet de fin d'études car nécessitant une plus forte implication des responsables du réseau routier.

RECOMMANDATIONS

Les quelques difficultés ou failles rencontrées aussi bien lors de la collecte des informations que dans la phase d'élaboration du catalogue nous conduisent à faire les recommandations suivantes :

1. Mener, grâce à la mise en place de laboratoires performants, des études poussées de caractérisation des matériaux routiers utilisés au Sénégal (détermination du module d'Young et des paramètres en fatigue). Le concepteur évitera ainsi d'utiliser des valeurs estimées pouvant s'écarter de la réalité.
2. Produire aux termes de ces études, un recueil de normes de manière à définir clairement les différentes classes pour chaque matériau.
3. Maîtriser l'évolution et la configuration du trafic en procédant à des campagnes de comptage plus fréquentes.
4. Prendre en compte l'effet des surcharges en l'absence d'un contrôle des charges à l'essieu.
5. Prendre en compte dans le dimensionnement les stratégies et politiques d'entretien routier définies par l'administration routière.
6. Élaborer, en parallèle avec le catalogue des structures types de chaussées neuves, un catalogue de renforcement et un guide d'entretien des chaussées au Sénégal.
7. Faire de tous ces catalogues une priorité et mettre en œuvre dès à présent l'ensemble des moyens techniques, humains et financiers nécessaire à leur élaboration.
8. Créer des « catalogues secondaires » ou réaliser un catalogue pour chaque région naturelle de manière à en prendre en compte la diversité et la dispersion des matériaux sur l'ensemble du territoire.
9. Poursuivre la présente étude, dans le cadre d'un PFE, afin de compléter les fiches manquantes, de les organiser sous forme d'une base de données informatisée, ou encore d'en tirer des abaques de dimensionnement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Autopsie d'une chaussée, LORINO, Tristan., LCPC , fichier .pdf, 83 p.
- [2] JEUFFROY, Georges & SAUTEREY, Raymond. Dimensionnement des chaussées, 2^{ème} édition, Presses ENPC, 1991, 231 p.
- [3] JEUFFROY, Georges & SAUTEREY, Raymond. Assises de chaussées, Presses ENPC, 1985, 144 p.
- [4] GAGNON, Luc. Techniques routières, 1981, 245 p.
- [5] Projet de construction routière, BERTHIER, Jean. Techniques de l'Ingénieur, fichier .pdf, 39 p.
- [6] Granulats et liants routiers, BERTHIER, Jean. Techniques de l'Ingénieur, fichier .pdf 13 p.
- [7] Guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussée, LCPC-SETRA, 1994
- [8] Catalogue des structures types de chaussées neuves, LCPC- SETRA, 1998
- [9] MBODJI, Ousmane. Esquisse d'un catalogue de dimensionnement des chaussées pour le Sénégal , Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, ESP Thiès, Juillet 2003, 65 p.
- [10] GUEYE, Serigne Modou. & CISSOKHO, Ibrahima. Élaboration d'un catalogue de dimensionnement des chaussées souples pour la zone ouest du Sénégal , Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, ESP Thiès Juillet, 2004, 73 p.
- [11] Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques – Tome 2 : études et construction, Secrétariat d'État chargé aux Affaires Étrangères chargé de la Coopération, 1972, 483 p.

[12] Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques – Tome 3 : entretien et exploitation de la route, Secrétariat d'État chargé aux Affaires Étrangères chargé de la Coopération, 1972, 394 p.

[13] Conception et analyse des chaussées - Module 1: Calcul des contraintes et des déformations dans la chaussée, DORE Guy. ing.PhD. , Département de génie civil U. Laval, fichier .ppt

[14] Réalisation des infrastructures de transport, Laboratoire des voies de circulation (LAVOC) EPFL, 2003

[15] Réalisation des remblais et des couches de forme Fascicule I, LCPC-SETRA, 1992, 97 p.

[16] Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière, ISTED-CEBTP, 1990, 198 p.

[17] Rapport sur l'évaluation et la présentation des propositions pour le dimensionnement des structures de chaussées à adopter (Gossas – Kaolack – Sokone / Nioro / Birkelane), Associated Engineers, 2005.

CATALOGUE DES STRUCTURES TYPES DE CHAUSSEES

ANNEXE A : FICHES DE MATERIAUX

SOL DE PLATEFORME

CBR	5 < CBR < 10	10 < CBR < 15	15 < CBR < 30	CBR > 30
Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5
CBR de calcul	7.5	12.5	22.5	45
Module de calcul (MPa)	37.5	62.5	112.5	225

Tableau A0.1 : Caractérisation des sols de plateforme

HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT

Période de calcul p = 20 ans

Taux de croissance annuel du trafic t = 5%

Déformation admissible du sol : $\epsilon_{z,ad} = 0.028 \times (NE)^{-0.25}$ Contrainte admissible au sol : $\sigma_{z,ad} = \frac{0.3 \times CBR}{1 + 0.7 \times \log NE}$ en bars

Traffic	T1	T2	T3	T4	T5	T6
MJA	90	160	500	1200	2400	5100
CAM	0.6	0.8	1	1	1	1
NE (millions)	0.85	1.54	8.03	14.48	28.97	61.55

Classe de plateforme	CBR de calcul	Limites admissibles											
		$\epsilon_{z,ad}$	$\sigma_{z,ad}$ en bars	$\epsilon_{z,ad}$	$\sigma_{z,ad}$ en bars	$\epsilon_{z,ad}$	$\sigma_{z,ad}$ en bars	$\epsilon_{z,ad}$	$\sigma_{z,ad}$ en bars	$\epsilon_{z,ad}$	$\sigma_{z,ad}$ en bars	$\epsilon_{z,ad}$	$\sigma_{z,ad}$ en bars
S2	7.5	0.444	0.422	0.392	0.374	0.302	0.021						
S3	12.5	6.09E-04	0.740	7.94E-04	0.703	5.00E-04	0.653	4.54E-04	0.624	3.62E-04	0.603	3.16E-04	0.034
S4	22.5	1.331	1.266	1.175	1.123	1.085	0.062						
S5	45.0	2.663	2.532	2.349	2.245	2.169	0.124						

Tableau A0.2 : Contraintes et déformations admissibles pour les sols de plateforme

FM 1 : SABLE NATUREL (SN)

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Propriétés	Valeurs
CBR	> 30 pour T ₁ > 35 pour T ₂
% de fines (passant au tamis 80µm)	10 < f < 30
IP	≤ 15
C _u	≥ 5
γ _d (à 95 % de l'OPM)	≥ 1.80
f × IP	100 < (f × IP) < 500
W _{lim} (%)	7 < W _{lim} < 13 (%)
Gonflement maximal	2.5

Tableau A1.1 : Spécifications sur les sables naturels [9]

Classes de trafic	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
Couches	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
Emploi	oui	x	oui	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tableau A1.2 : Domaine d'utilisation des graves naturelles

HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT

Module de rigidité E = 5 x CBR

Coefficient de Poisson ν = 0.35

Déformation admissible du sol : $\epsilon_{z,ad} = 0.028 \times (NE)^{-0.25}$ Contrainte admissible sur sol : $\sigma_{z,ad} = \frac{0.3 \times CBR}{1 + 0.7 \times \log NE}$ en bars

Trafic	T1	T2	T3	T4	T5	T6
NE (millions)	0.87	1.54	4.83	11.59	23.17	49.24
CBR de calcul				30		
E (en Mpa)				150		
$\epsilon_{z,ad}$	9.17E-04	7.98E-04	5.97E-04	4.80E-04	4.04E-04	3.34E-04
$\sigma_{z,ad}$ en bars	1.745	1.688	1.585	1.514	1.462	1.410

Tableau A1.3 : Contraintes et déformations admissibles pour les sables naturels

FM 2 : GRAVE NATURELLE (GN)

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Spécifications	Fondation	Base
LA	< 50	< 40
MDE	< 30	< 25
C _u	> 10	> 12
% de fines	2 < f < 15 si IP ≠ 0 4 < f < 5 si IP = 0	2 < f < 15 si IP ≠ 0 4 < f < 5 si IP = 0
IP	< 12	< 6

Tableau A2.1 : Spécifications sur les graves naturelles [9]

Tamis (mm)	% passant	
	0/31.5	0/40
40	100	95 - 100
31.5	80 - 100	65 - 97
20	65 - 90	65 - 90
10	40 - 75	40 - 75
5	30 - 60	30 - 63
2	20 - 45	20 - 45
1	15 - 37	
0.5	10 - 20	12 - 30
0.08	2 - 15 si IP ≠ 0 4 - 5 si IP = 0	2 - 15 si IP ≠ 0 4 - 5 si IP = 0

Tableau A2.2 : Fuseaux granulaires pour les graves naturelles [9]

Classes de trafic	T1		T2-		T2+		T3-		T3+	
	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
Couches										
Emploi	oui	oui	oui	oui	oui	x*	x*	x	x*	x

Tableau A2.3 : Domaine d'utilisation des graves naturelles:

*sauf étude particulière

HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT

Module de rigidité $E = 5 \times \text{CBR}$ Coefficient de Poisson $\nu = 0.35$ Déformation admissible du sol : $\epsilon_{z,ad} = 0.028 \times (\text{NE})^{-0.25}$ Contrainte admissible sur sol : $\sigma_{z,ad} = \frac{0.3 \times \text{CBR}}{1 + 0.7 \times \log \text{NE}}$ en bars

Trafic	T1	T2	T3	T4	T5	T6
NE (millions)	0.87	1.54	4.83	11.59	23.17	49.24
CBR de calcul				60		
E (en Mpa)				300		
$\epsilon_{z,ad}$	0.17E-04	7.95E-4	5.97E-04	4.80E-04	4.04E-04	3.34E-04
$\sigma_{z,ad}$ en bars	3.490	3.376	3.170	3.028	2.924	2.819

Tableau A2.4 : Contraintes et déformations admissibles pour les graves naturelles

**FM 3 : GRAVE NON TRAITEE (GNT) et
GRAVE RECONSTITUEE HUMIDE (GRH)**

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

PLJ/voie	ES		LA		MDE	
	Fondation	Base	Fondation	Base	Fondation	Base
< 25	> 40	> 40	< 30	< 40	< 25	< 35
25 à 150	> 50	> 50	< 25	< 30	< 20	< 25
> 150		> 50		< 25		< 20

Tableau A3.1 : Valeurs minimales de ES, LA et MDE pour les GNT et GRH [5]

Tamis (mm)	% passant	
	0/31.5	0/40
50		100
40	100	95 - 100
31.5	95 - 100	85 - 97
20	64 - 90	65 - 90
10	40 - 70	40 - 75
6.3	30 - 60	30 - 63
2	20 - 42	20 - 45
0.5	10 - 25	12 - 30
0.08	2 - 10	4 - 12
	4 - 10 si IP = 0	4 - 10 si IP = 0

La valeur de l'indice de plasticité doit être inférieure à 6 (IP < 6)
 IC > 80 pour une utilisation en couche de base
 IC > 60 pour une utilisation en couche de fondation

Tableau A3.2 : Fuseaux granulaires pour les GNT/GRH [9]

Classes de trafic	T1		T2-		T2+		T3-		T3+	
Couches	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
Emploi	oui	oui	oui	oui	oui	x*	x*	x	x*	x

Tableau A3.3 : Domaine d'emploi des GNT/GRH

*sauf étude particulière

HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT

Module de rigidité $E = 5 \times \text{CBR}$

Coefficient de Poisson $\nu = 0.35$

Déformation admissible du sol : $\epsilon_{z,ad} = 0.028 \times (\text{NE})^{-0.25}$

Contrainte admissible au sol : $\sigma_{z,ad} = \frac{0.3 \times \text{CBR}}{1 + 0.7 \times \log \text{NE}}$ en bars

Trafic	T1	T2	T3	T4	T5	T6
NE (millions)	0.87	1.54	4.83	11.59	23.17	49.24
CBR de calcul			80			
E (en Mpa)			400			
$\epsilon_{z,ad}$	9.17E-04	7.95E-04	5.97E-04	4.80E-04	4.04E-04	3.34E-04
$\sigma_{z,ad}$ en bars	4.653	4.502	4.226	4.037	3.896	3.766

Tableau A3.4 : Contraintes et déformations admissibles pour les GNT

Trafic	T1	T2	T3	T4	T5	T6
NE (millions)	0.87	1.54	4.83	11.59	23.17	49.24
CBR de calcul			100			
E (en Mpa)			500			
$\epsilon_{z,ad}$	9.17E-04	7.95E-04	5.97E-04	4.80E-04	4.04E-04	3.34E-04
$\sigma_{z,ad}$ en bars	5.817	5.627	5.283	5.046	4.874	4.699

Tableau A3.5 : Contraintes et déformations admissibles pour les GRH

FM 4 : GRAVELEUX LATÉRIQUES CRUS (LAT)

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Spécifications	Fondation	Base
Dimension maximale	≤ 60 mm	≤ 50 mm
% de fines	5 ≤ f ≤ 35	4 ≤ f ≤ 20
C _u	≤ 30	≤ 20
IP	≤ 20 pour T3 - T4 - T5 ≤ 35 pour T1 - T2	≤ 18 pour T5 ≤ 20 pour T3 - T4 ≤ 22 pour T1 - T2
γ _d (à 95 % de l'OPM)	≥ 1.90 à 2	≥ 2.1
Teneur en matières organiques	≤ 1.5 %	≤ 1 %
CBR (à 90 % de l'OPM)	> 30 > 35 pour T4 - T5	> 80 > 60 pour T1
Gonflement linéaire	Entre 1 et 2%	≤ 1%
Épaisseur minimale	15 cm	15 cm

Tableau A4.1 : Spécifications sur les graveleux latéritiques crus [9]

Tamis (mm)	% passant	
	Fondation	Base
40	100	95 - 100
31.5	80 - 100	85 - 100
20	75 - 90	60 - 100
10	58 - 100	35 - 90
5	40 - 78	20 - 75
2	28 - 65	12 - 50
1	22 - 56	10 - 40
0.5	18 - 50	7 - 35
0.08	5-35	4 - 20

Tableau A5.2 : Fuseaux granulaires pour les graveleux latéritiques crus après compactage (CEBTP) [9]

Classes de trafic	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
Couches	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
Emploi	oui	x	x	x								

Tableau A4.3 : Domaine d'emploi des graveleux latéritiques crus

HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT

Module de rigidité E = 5 x CBR

Coefficient de Poisson ν = 0.35

Déformation admissible du sol : $\epsilon_{z,ad} = 0.028 \times (NE)^{-0.25}$ Contrainte admissible sur sol : $\sigma_{z,ad} = \frac{0.3 \times CBR}{1 + 0.7 \times \log NE}$ en bars

	Trafic	T1	T2	T3	T4	T5	T6
NE (millions)		0.87	1.54	4.83	11.59	23.17	49.24
CBR de calcul	Fondation (LAT1)				30		
	Base (LAT2)				80		
Module E (en Mpa)	Fondation (LAT1)				150		
	Base (LAT2)				400		
ε _{z,ad}	Fondation (LAT1)						
	Base (LAT2)	9.17E-04	7.95E-04	5.97E-04	4.80E-04	4.04E-04	3.34E-04
σ _{z,ad} en bars	Fondation (LAT1)						
	Base (LAT2)	1.745	1.688	1.585	1.514	1.462	1.410
		4.653	4.502	4.226	4.037	3.899	3.759

Tableau A4.4 : Contraintes et déformations admissibles pour les graveleux latéritiques crus

FM 5 : GRAVELEUX LATÉRIQUES AMÉLIORÉS AUX CONCASSÉS (LACo)

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX

Spécifications	Graveleux latéritiques utilisés	Matériaux d'ajout (20 à 50% du poids)	
		Grave 0/31.5	Grave concassée de calcaire
% passant au tamis 40mm	100	-	-
% passant au tamis 2mm	20 à 50	< 30	< 30
% de fines	10 à 25	< 18	< 18
IP	< 20	0	0
γ_d (à 95 % de l'OPM)	-	≥ 2.2	≥ 2.2
CBR (à 95 % de l'OPM)	40 à 60	> 80	> 80
ES	> 50	> 50	> 50
LA	< 30	< 30	< 12
MDE	-	-	< 30
ACV	-	-	< 25

Tableau A5.1 : Spécifications sur les graveleux latéritiques améliorés aux concassés [9]

Tamis (mm)	% passant	
	Grave 0/31.5 (basalte ou silicite)	Grave concassée de calcaire
40	100	100
31.5	95 - 100	85 - 100
20	64 - 90	62 - 90
10	40 - 70	35 - 62
5	30 - 60	20 - 56
2	20 - 42	19 - 43
1	-	14 - 43
0.5	10 - 28	3 - 14
0.08	2 - 10	2 - 10

Tableau A5.2 : Fuseaux granulaires pour les graveleux latéritiques améliorés aux concassés [9]

Classes de trafic	T1		T2		T3		T4		T5	
Couches	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
Emploi	oui									

Tableau A5.3 : Domaine d'utilisation des graveleux latéritiques améliorés aux concassés

HYPOTHÈSES DE DIMENSIONNEMENT

Modulus de rigidité $E = 5 \times \text{CBR}$

Coefficient de Poisson $\nu = 0.35$

Déformation admissible du sol : $\epsilon_{z,ad} = 0.028 \times (\text{NE})^{-0.25}$

Contrainte admissible au sol : $\sigma_{z,ad} = \frac{0.3 \times \text{CBR}}{1 + 0.7 \times \log \text{NE}}$ en bars

Trafic	T1	T2	T3	T4	T5	T6
NE (millions)	0.87	1.54	4.83	11.59	23.17	49.24
CBR de calcul	100					
E (en Mpa)	500					
$\epsilon_{z,ad}$	9.17E-04	7.95E-04	5.97E-04	4.80E-04	4.04E-04	3.34E-04
$\sigma_{z,ad}$ en bars	5.817	5.627	5.283	5.046	4.874	4.699

Tableau A5.4 : Contraintes et déformations admissibles pour les graveleux latéritiques améliorés aux concassés

FM 6 : GRAVES TRAITÉES AUX LIANTS HYDRAULIQUES (GC)

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Type de liants	Dosage pondéral par rapport au mélange sec grave + liant
Laitier granulé	8 à 20 % suivant réactivité des laitiers et nature de l'activant de prise
Laitier (granulé ou bouleté) prébroyé	8 à 15 %
Ciments	3 à 5 %
Liants spéciaux à usage routier	3,5 à 5 %
Cendres hydrauliques	3,5 à 4 %
Cendres volantes-chaux	10 à 15 %
Pouzzolanes-chaux (reconstitués en centrale)	15 à 25 % suivant la classe des pouzzolanes et la nature pétrographique de la grève

Tableau A6.1 : Dosages en liants moyens admissibles [5]

Trafic	Poids lourds / jour (véh./jour)	Caractéristiques	Couche de fondation	Couche de base et renforcement
T3 et moins	< 25 (< 500)	LA	≤ 40	≤ 40
		MDE	≤ 35	≤ 35
		ES	≥ 30	≥ 30
T3	25 à 150 (500 à 3000)	IC	≥ 30	≥ 30
		LA	≤ 40	≤ 30
		MDE	≤ 35	≤ 25
T2	150 à 300 (3000 à 6000)	ES	≥ 30	≥ 40
		IC	≥ 30	≥ 60
		LA	≤ 40	≤ 30
T1 et T0	> 300 (> 6000)	MDE	≤ 35	≤ 25
		ES	≥ 30	≥ 40
		IC	≥ 30	100

IC : indice de concassage (en %) = proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension D du granulat élaboré
MDE : Microdeval humide LA : Coefficient de Los Angeles ES : équivalent de sable

Tableau A6.2 : Caractéristiques des granulats pour assises traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques [5]

Type de grève traitée	IQE (cm)	R ₃₆₀ (MPa)	E ₃₆₀ (10 ³ MPa)
Grève - laitier granulé	23 à 24	≥ 0,65	≤ 20
Grève - pouzzolane-chaux			
Grève - laitier prébroyé	23 à 22	≥ 0,80	≤ 25
Grève - ciments normalisées - liants spéciaux - cendres hydrauliques	20 à 26	≥ 1,10	≤ 40
Grève - cendres volantes - chaux	18 à 23	≥ 1,40	≤ 45

Tableau A6.3 : Performances à un an des graves traitées [5]

Tamis (mm)	% passant					
	Grève 0/20			Grève 0/31,5		
	minima	maxima	moyenne	minima	maxima	moyenne
31,5	-	-	-	85	-	-
20	85	-	-	62	88	75
10	52	78	65	40	66	53
6,3	40	64	52	31	55	43
4	32	56	44	25	48	37
2	25	45	35	20	40	30
0,5	12	26	20	9	24	16
0,2	6	16	11	4	16	10
0,08	2	6	4	2	8	5

Tableau A6.4 : Fuseaux granulaires pour les graves-ciment [3]

(Assises de chaussées Jeuffroy et Sauterey - Presses ENPC)

Type de grève	Couche de base	Couche de fondation
Grève-ciment	15 à 28 cm	15 à 28 cm
Grève-laitier	15 à 28 cm	15 à 28 cm
Grève-cendres volantes	18 à 25 cm	15 à 28 cm
Grève-pouzzolane	18 à 25 cm	15 à 25 cm

Tableau A6.5 : Ordre de grandeur des épaisseurs pour assises traitées aux liants hydrauliques [3]

Classes de trafic	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
Couches	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
Emploi	x	x	x	oui								

Tableau A6.6 : Domaine d'utilisation des graves traitées au ciment

HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT

Module de rigidité $E = 20\,000\text{ MPa}$

Coefficient de Poisson $\nu = 0.25$

$\sigma_s = 0.75\text{ MPa}$

$\lambda_B = 15$

$B_N = 1$

$S_h = 0\text{ cm}$

$k_c = 1.4$

$k_d = 1$

$\rho = 0.02\text{ cm}^2$

Module de la couche sous-jacente	Valeur de k_s
$E < 50\text{ MPa}$	10.2
$50 \leq E \leq 120\text{ MPa}$	10.1
$E \geq 120\text{ MPa}$	1

Tableau A7.1 : Valeurs de k_s

Traffic	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
ME (millions)	1.41	2.51	7.54	18.83	37.56	60.02	
Risque de colmat (%)	12.0	7.5	5.0	2.5	2.5	2.5	
μ	-1.175	-1.438	-1.645	-1.860	-1.980	-1.980	
δ	1.345						
Coefficient de risque k_r	0.785	0.743	0.712	0.667	0.667	0.667	
α (ME)	0.73	0.71	0.65	0.62	0.58	0.56	
σ_{all} (en MPa)	$k_a = 10.2$	0.67	0.61	0.54	0.48	0.46	0.44
	$k_a = 10.1$	0.73	0.67	0.59	0.52	0.50	0.48
	$k_a = 1$	0.81	0.73	0.65	0.58	0.55	0.52

Tableau A7.2 : Contraintes et informations supplémentaires pour les graves-ciment

FM 7 : GRAVELEUX LATÉRIQUES TRAITÉS AU CIMENT (LAC)

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Spécifications	Fondation (T ≥ T3)	Base (T1 à T3)
Dimension maximale	10 ≤ D ≤ 50 mm	10 ≤ D ≤ 50 mm
% de fines	≤ 35	≤ 35
IP	≤ 30	≤ 25
Module de plasticité = m*IP (m est le module = % passant au tamis 0.425)	≤ 2500	≤ 2000
Teneur en matières organiques	≤ 1.5 %	≤ 1 %
CBR (à 90 % de l'OPM)	≥ 40	≥ 60
Gonflement linéaire	Entre 1 et 2%	≤ 1%
Épaisseur minimale	15 cm	15 cm

Tableau A8.1 : Spécifications sur la latérite crue utilisée [9]

HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT

Module de rigidité E = 1200 MPa

Coefficient de Poisson ν = 0.25

σ₁ = 0.42 MPa

-1/b = 10.9

SN = 0.7

Sh = 2.5 cm

k_c = 1.4k_s = 1c = 0.02 cm⁻¹

Module de la couche sous-jacente	Valeurs de k _s
E < 50 MPa	1/1.2
50 ≤ E ≤ 120 MPa	1/1.1
E ≥ 120 MPa	1

Tableau A8.4 : Valeurs de k_s

Spécifications	Fondation (amélioré avec 2 à 3 %) (T3 à T5)	Base (traités 3 à 6 %) (T1 à T3 et T4 parfois)
Résistance à la compression simple (bars)		Entre 14 et 30
- après 7 jours de cure à l'air R _c		> 5
- après 3 jours de cure à l'air et 4 jours dans l'eau R' _c		0.5
Rapport R' _c / R _c		> 3
Résistance à la compression diamétrale à 7 jours R _{td} (bars)		
Indice CBR		
- après 7 jours de cure à l'air		≥ 100
- après 3 jours de cure à l'air et 4 jours dans l'eau	≥ 100	≥ 160
Épaisseur comprise entre 15 et 25 cm		

Tableau A8.2 : Spécifications sur le mélange des graveleux latéritiques traités au ciment

Trafic	T1	T2	T3	T4	T5	T6
NE (millions)	1.41	2.51	7.84	18.83	37.66	80.02
Risque de calcul (%)	12.0	7.5	5.0	2.5	2.5	2.5
u	-1.175	-1.439	-1.645	-1.960	1.960	-1.960
δ			1.139			
Coefficient de risque k _r	0.754	0.707	0.673	0.624	0.624	0.624
σ _t (NE)	0.41	0.39	0.35	0.32	0.30	0.28
ks = 1/1.2	0.383	0.341	0.293	0.250	0.235	0.219
σ _{t,ad} (en Mpa) ks = 1/1.1	0.418	0.372	0.319	0.273	0.256	0.239
ks = 1	0.460	0.410	0.351	0.300	0.282	0.263

Tableau A8.5 : Contraintes et déformations admissibles pour les graveleux latéritiques traités au ciment

Classes de trafic	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
Couches	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
Emploi	x	oui	x	oui								

Tableau A8.3 : Domaine d'utilisation des graveleux latéritiques traités au ciment

FM 8 : SABLES TRAITES AU CIMENT (SC)

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Spécifications	Fondation (T1 et T2)	Base (T1 et T2)
Dimension maximale	0.5 ≤ D ≤ 10 mm	10 ≤ D ≤ 50
% de fines	≤ 50	≤ 35
IP	≤ 30	≤ 25
v _r (à 95 % de l'OPM)	≥ 1.90	≥ 2.1
Module de plasticité = n*IP (n est le rapport = 1/3 passant au tamis 0.425)	≤ 2500	≤ 2000
Teneur en matières organiques	≤ 2 %	≤ 1 %
C _u	≥ 5	≥ 5

Tableau A9.1 : Spécifications sur les sables traitables au ciments [9]

Spécifications	Fondation (T1 et T2)	Base (T1 et T2)
Résistance à la compression simple (bars)		
- après 7 jours de cure à l'air R _c	5	Entre 16 et 30
- après 3 jours de cure à l'air et 4 jours dans l'eau R' _c	2.5	
Rapport R' _c / R _c	0.5	≥ 5
Résistance à la compression diamétrale à 28 jours R _{td} (bars)	≥ 3	
Indice CBR		
- après 7 jours de cure à l'air	≥ 80	
- après 3 jours de cure à l'air et 4 jours dans l'eau	≥ 60	≥ 160
Dosage en ciment compris entre 2 et 3%		
Épaisseur comprise entre 15 et 25 cm		

Tableau A9.2 : Spécifications sur le mélange sol-ciment [9]

Sable-laitier R _t à 100 (MPa)	Classification mécanique	Sable-ciment R _t à 100 (MPa)
R _t < 0.15	Emploi en couche de base ou fondation non envasée	R _t < 0.20
0.15 ≤ R _t < 0.25		0.20 ≤ R _t < 0.35
0.25 ≤ R _t < 0.40		0.35 ≤ R _t < 0.50
0.40 ≤ R _t < 0.65		0.50 ≤ R _t < 0.75
R _t ≥ 0.65		R _t ≥ 0.75

Tableau A9.3 : Classification mécanique des sables traités aux liants hydrauliques [5]

Classes de trafic	T1		T2		T3		T4		T5	
Couches	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
Emploi	oui	oui	oui	oui	x	x	x	x	x	x

Tableau A9.4 : Domaine d'utilisation des sables traités au ciment

HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT

Module de rigidité E = 12 000 MPa
 Coefficient de Poisson ν = 0.25
 σ_u = 0.5 MPa
 -10b = 12
 SN = 0.8
 S_n = 2.5 cm
 k₁ = 1.5
 k₂ = 1
 c = 0.02 cm⁻¹

Module de la couche sous-jacente	Valeurs de k _s
E < 50 MPa	1/1.2
50 ≤ E ≤ 120 MPa	1/1.1
E ≥ 120 MPa	1

Tableau A9.5 : Valeurs de k_s

Trafic	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
NE (millions)	1.41	2.51	7.84	18.83	37.66	80.02	
Risque de calcul (%)	12.0	7.5	5.0	2.5	2.5	2.5	
u	-1.175	-1.439	-1.645	-1.960	-1.960	-1.960	
δ	1.000						
Coefficient de risque k _r	0.798	0.769	0.729	0.687	0.687	0.687	
σ _r (NE)	0.39	0.37	0.34	0.31	0.30	0.28	
σ _{adm} (en Mpa)	k _s = 1/1.2	0.39	0.35	0.31	0.27	0.25	0.24
	k _s = 1/1.1	0.42	0.38	0.34	0.29	0.28	0.26
	k _s = 1	0.47	0.42	0.37	0.32	0.30	0.29

Tableau A9.6 : Contraintes et déformations admissibles pour les sables traités au ciment

FM 9 : GRAVE-BITUME (GB) / GRAVE EMULSION (GE)

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Spécifications	Couche de fondation	Couche de base
LA	< 45	< 35
ES	> 30	> 40
IC	80 %	100 %
λ	< 30	< 20
β	0	0
% vides	entre 8 et 12 %	entre 8 et 12 %
Refus au tamis 25 mm	< 10 %	< 10 %
Quantité de filin	> 7.3 %	> 7.3 %
Teneur en matières organiques	< 1 %	< 0.5 %
Teneur en bitume	3 à 4 %	3 à 4 %

Tableau A10.1 : Spécifications sur les granulats pour graves-bitume et graves-émulsion [9]

Trafic (Poids lourds journaliers, charge utile > 5t)	Renforcements		Chaussées neuves	
	Minimum	Conseillé	Base de chaussées souples Fondation de chaussée en béton	Fondation de chaussée souple
< 150	> 25 %	> 40 %	> 25 %	à la rigueur grave entièrement roulée
150 à 600	> 40 %	> 60 %	> 40 %	> 25 %
800 à 1000	100 %		> 60 %	> 25 %
1000 à 1500			100 %	> 40 %
> 1500	Entièrement concassée			> 40 %

Tableau A10.2 : Graves pour graves-bitume et graves-émulsion : angularité, indices de concassage [5]

Tamis (mm)	% passant	
	Graves-bitume	Graves-émulsion
40	100	100
31.5	95 - 100	95 - 100
20	-	-
10	55 - 82	40 - 70
6.3	47 - 70	30 - 57
3	20 - 50	18 - 40
0.5	17 - 32	8 - 25
0.08	4 - 10	4 - 8

Tableau A10.3 : Fuseaux granulaires pour les graves-bitume 0/31.5 (CEBTP) [9]

Trafic (Poids lourds journaliers, charge utile > 5t)	Chaussées neuves		
	Renforcements	Base de chaussées souples Fondation de chaussée en béton	Fondation de chaussée souple
< 150	< 30	< 30	< 40
150 à 600	< 25	< 30	< 40
> 600	< 25	< 25	< 40

Remarque : la propriété des graves ci-dessus spécifiées est définie par l'équivalent de sable (ES) qui doit être conforme aux seuils suivants (f est la teneur en fines) :

$f < 12\%$	ES > 45
$12 \leq f < 15\%$	ES > 40
$f \geq 15\%$	ES > 25

Tableau A10.4 : Dureté des graves pour graves-bitume et grave-émulsion : coefficient de Los Angeles [5]

Performances	Couche de base	Couche de fondation
Compacité LCPC		
- minimale (%)	88	85
- maximale (%)	96	96
Résistance à la compression	IC ≥ 85	IC < 85
- avec bitume 60/70 (MPa)	> 5	> 4
- avec bitume 40/50 (MPa)	> 6	> 5
Rapport immersion-compression	0.65	0.65

Tableau A10.5 : Performances des graves-bitume dans l'essai d'immersion compression LCPC à 18°C [5]

Caractéristiques	Couche de base ou de fondation
Compacité LCPC (%)	> 85
Résistance à la compression	
- avec bitume 180/220 (MPa)	> 2
- avec bitume 90/100 (MPa)	> 3
- avec bitume 40/50 (MPa)	> 4
Rapport immersion-compression	> 0.55

Tableau A10.6 : Performances des graves-émulsion dans l'essai d'immersion-compression LCPC à 18°C [5]

Classes de trafic	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
Couches	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
Emploi	x	x	x	x	x	oui	x	oui	x	oui	x	oui

Tableau A10.7 : Domaine d'utilisation des graves-bitume

HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT

Module de rigidité E (10°C et 10 Hz) = 12 300 MPa

Module de rigidité E (30°C et 10 Hz) = 2 700 MPa

Coefficient de Poisson $\nu = 0,35$

$\epsilon_s 10^6$ (à 10°C, 25Hz) = 80

$\lambda/b = 5$

BN = 0,3

Sb = 3 cm

$k_p = 1,3$

$c = 0,02 \text{ cm}^2$

Module de la couche scab-jointe	Valeur de k_s
$E < 50 \text{ MPa}$	1/1,2
$50 \leq E \leq 120 \text{ MPa}$	1/1,1
$E \geq 120 \text{ MPa}$	1

Tableau A11.1 : Valeurs de k_s

Traffic	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
NE (trafic)	0,67	1,54	4,83	11,89	23,17	48,24	
Risque de calcul (%)	25,0	12,0	5,0	2,0	2,0	2,0	
α	-0,674	-1,175	-1,645	-2,054	-2,054	-2,054	
β	0,381						
Coefficient de risque k_r	0,688	0,810	0,744	0,881	0,831	0,691	
$\sigma (NE, k_r, \beta) 10^4$	175,57	158,62	124,52	104,80	91,07	78,32	
$\epsilon_{scab} 10^4$	$k_s = 1/1,2$	188,48	137,38	100,43	78,32	68,19	58,05
	$k_s = 1/1,1$	193,81	149,04	109,56	85,44	74,39	63,88
	$k_s = 1$	202,19	164,63	120,51	93,99	81,63	70,37

Tableau A11.2 : Contraintes et déformations admissibles pour les gravés-émulés et gravés-bitume

FM 10 : SABLE-BITUME (SB)

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Spécifications	Fondation T ₄ et T ₅
	Base T ₁ à T ₃
% fines	entre 10 et 30 %
IP	≤ 15
C _a	≥ 5
γ _s (à 95 % de l'OPM)	≥ 1,80
LL	≤ 38
ES	Entre 15 et 30

Tableau A12.1 : Spécifications sur les sables traitables au bitume [9]

Spécifications	Fondation		Base	
	T1 et T2	T3	T1 et T2	T3
R _{lim}	2	4	4	8
R _{c min} / R _{lim}	0,5	0,5	0,4	0,5

Le liant est un bitume 50/70

La hauteur de mise en oeuvre est comprise entre 15 et 30 cm

Tableau A12.2 : Performances sur les mélanges de sables-bitume [9]

Type de sable	A	B	C	D
R (MPa)	< 2	2 ≤ R ≤ 4	4 ≤ R ≤ 8	≥ 8
i/R		> 0,50		

Tableau A12.3 : Classification des sables-bitume dans l'essai d'immersion compression LCPC à 18°C [7]

Classes de trafic	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
Couches	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
Emploi	oui	x	oui	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tableau A12.4 : Domaine d'emploi des sables-bitume

HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT

Module de rigidité E (10°C et 10 Hz) = 12 300 MPa

Module de rigidité E (30°C et 10 Hz) = ???? MPa

Coefficient de Poisson ν = 0,35

ε_s 10⁴ (à 10°C, 25Hz) = ????-M_b = 5S_N = 0,3S_b = 3 cmk_s = 1,5c = 0,02 cm⁻¹

FICHE 11 : ENDUITS SUPERFICIELS (ESU)

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Essais	Trafic (PLj)				
	T3 et inférieur à T3		T2	T1	T0
	< 25	25 à 150	150 à 300	300 à 750	> 750
LA	≤ 25	≤ 20	≤ 15	≤ 15	≤ 15
MDE	≤ 20	≤ 15	≤ 10	≤ 10	≤ 10
A	≤ 25	≤ 20	≤ 20	≤ 15	≤ 10
P1	≤ 2	≤ 2	≤ 1	≤ 0.5	≤ 0.5
CPA	≥ 0.45 (1)	≥ 0.5	≥ 0.5	≥ 0.5	≥ 0.55
RC	-	> 4	> 4	> 6	(2)
IC	100	-	-	-	-

(1) 0.40 comme minimum lorsque la vitesse est inférieure à 80 km/h (2) pas de matériaux alluvionnaires dans cette classe de trafic
 LA : coefficient de Los Angeles MDE : essai Microdeval en présence d'eau A : coefficient d'aplanissement
 P1 : % d'éléments inférieurs à 0.5mm CPA : coefficient de polissage accéléré RC : rapport de concassage
 IC : indice de concassage

Tableau A13.1 : Caractéristiques des granulats pour enduits superficiels [5]

Type de liant	Trafic (PLj)				
	T3 et inférieur à T3		T2	T1	T0
	< 25	25 à 150	150 à 300	300 à 750	> 750
Bitumes fluidifiés	400/600	800/1400	-	-	-
Bitumes fluxés	400/600	800/1200	1200/1600	1600/2400	-
Bitumes goudrons	1200	2000	2000	2000	-
Émulsions	55%	65%	69%	-	-

Tableau A13.2 : Choix du type de liants en fonction du trafic pour enduits superficiels

	Dosage d/D (mm)	Liant résiduel (kg/m ²)		Granulats (1) (L/m ²)	
		Couche	Total	1 ^{re} couche (3)	2 ^{me} couche (4)
Monocouche	2/4	0.800	-	4 à 5	-
	4/6	1.000	-	6 à 7	-
	6/10	1.300	-	8 à 9	-
	10/14	1.600	-	11 à 13	-
	14/20 (2)	1.900	-	15 à 18	-
Bicouche	6/10 - 2/4	0.7	1.7	8 à 9	4 à 5
	6/10 - 4/6	+ 1	-	-	6 à 7
	10/14 - 4/6	0.8	2.0	11 à 13	-
	10/14 - 6/10	+ 1.2	-	-	-
	14/20 - 6/10	1.0	2.3	13 à 15	8 à 9

(1) doit correspondre au pouvoir couvrant réel des matériaux majorés de 3 à 5%
 (2) des essais préliminaires sont conseillés
 (3) doit correspondre au pouvoir couvrant des granulats
 (4) ces quantités peuvent être légèrement augmentées, notamment lors d'une mise en œuvre par temps très chaud afin d'éviter le collage aux pneumatiques

Tableau A13.3 : Dosage en gravillons et en liants pour enduits superficiels [5]

Classes de trafic	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Utilisation	oui	oui	oui	x	x	x

Tableau A13.4 : Domaine d'emploi des enduits superficiels

FM 12 : BETON BITUMINEUX (BB)

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Spécifications	Valeurs
LA	< 22
ES	> 50
MDE	≤ 15
R _c	≥ 4
IP	= 0
% vides	entre 6 et 8 %

Tableau A14.1 : Spécifications sur les granulats pour bétons bitumineux [9]

Tamis (mm)	FUSEAUX LCPC-SETRA		FUSEAUX CEBTP		
	% passant		% passant		
	0/12	0/14	0/10	0/14	0/14
20					100
16	100	100			
14		94 - 100	100	100	95 - 100
12	75 - 100				
10		72 - 84	80 - 100	95 - 100	75 - 100
8	60 - 85				
6.3		56 - 66	60 - 100	65 - 92	50 - 88
4	40 - 80	40 - 54			
2		28 - 40	25 - 75	25 - 65	23 - 60
1.5	28 - 67				
0.8	20 - 55				
0.2			6 - 25	6 - 20	6 - 20
0.16	6 - 22				
0.08	5 - 10	7 - 10	3 - 7	3 - 8	3 - 8

Tableau A14.2 : Fuseaux granulométriques pour bétons bitumineux [9]

Spécifications	Valeurs	
	0/10	0/14
Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire		
• Compacité à 10 girations C10	< 89 %	< 89 %
• Compacité à 80 girations C60	92 - 95 %	93 - 96 %
Essai de compression simple LCPC		
• Compacité		
- couche de roulement	91 ≤ C ≤ 95	92 ≤ C ≤ 96
- couche de liaison	90 ≤ C ≤ 94	90 ≤ C ≤ 94
• Résistance à la compression à sec R à 18°C		
- avec un bitume 180/220	> 4 MPa	> 4 MPa
- avec un bitume 80/100	> 5 MPa	> 5 MPa
- avec un bitume 60/70	> 6 MPa	> 6 MPa
- avec un bitume 40/50	> 7 MPa	> 7 MPa
• Rapport immersion compression	> 0.75	> 0.75
Essai Marshall		
• Compacité		
- couche de roulement	≤ 97 %	≤ 97 %
- couche de liaison	≤ 95 %	≤ 95 %
Essai à l'ornièreur LPC		
• profondeur d'ornière à 30 000 cycles, à 60°C avec le bitume du chantier, estimés à la compacité à la presse à cisaillement giratoire, pour trafic T ₀ et T ₁ :		
- C60	≤ 10 %	
- C80		≤ 10 %

Tableau A14.3 : Spécifications sur le mélange des bétons bitumineux [5]

Les dosage en liants sont généralement compris entre :

- 5.5 et 5.8 % pour les 0/14
- 5.8 et 6.1 % pour les 0/10

Classes de trafic	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Emploi	oui	oui	oui	oui	oui	oui

Tableau A14.4 : Domaine d'emploi des bétons bitumineux

HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT

Module de rigidité E (10°C et 10 Hz) = 7.200 MPa

Module de rigidité E (30°C et 10 Hz) = 1.300 MPa

Coefficient de Poisson $\nu = 0.35$ $\epsilon_{s,10^6}$ (à 10°C, 25Hz) = 100 $-1/b = 5$

SN = 0.25

 $\delta h = 1 \text{ cm}$ $k_s = 1.1$ $c = 0.02 \text{ cm}^2$

Module de la couche sous-jacente	Valeurs de k_s
$E < 50 \text{ MPa}$	1/1.2
$50 \leq E < 120 \text{ MPa}$	1/1.1
$E \geq 120 \text{ MPa}$	1

Tableau A15.5 : Valeurs de k_s

Trafic	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
NE (millions)	0.67	1.54	4.83	11.58	23.17	48.24	
Risque de calcul (%)	25.0	12.0	5.0	2.0	2.0	2.0	
u	-0.674	-1.175	-1.645	-2.054	-2.054	-2.054	
δ	0.269						
Coefficient de risque k	0.920	0.864	0.815	0.775	0.775	0.775	
$e (NE, 0_{\text{max}}, 5, 10^6)$	241.99	215.87	171.75	144.17	125.52	107.95	
$\epsilon_{s,10^6}$	$k_s = 1/1.2$	304.04	171.05	128.39	102.44	88.19	76.71
	$k_s = 1/1.1$	222.58	186.60	140.06	111.75	97.30	83.68
	$k_s = 1$	244.84	205.28	154.07	122.93	107.03	92.05

Tableau A15.6 : Contraintes et déformations admissibles pour les bétons bitumineux

FM 13 : ENROBES DENSES (ED)

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Spécifications	Valeurs
LA	< 40 pour T1 et T2 < 22 pour T3 et T4
ES	> 40 à 50
MDE	≤ 15
D _{max}	entre 1/3 et 1/2 de l'épaisseur du tapis
IP	= 0
% vides	entre 10 à 12 %
Module de richesse K	entre 3 et 4

Tableau A16.1 : Spécifications sur les granules pour enrobés denses [9]

Tamis (mm)	% passant		
	0/10	0/14	0/14
20			100
14	100	100	95 - 100
10	80 - 100	95 - 100	75 - 100
6.3	60 - 100	85 - 92	50 - 88
2	25 - 75	25 - 65	23 - 60
0.2	8 - 25	8 - 20	6 - 20
0.08	3 - 7	3 - 8	3 - 8

Tableau A16.2 : Fuseaux granulométriques pour enrobés denses [9]

	Spécifications	80/100	80/70
		Statut	> 600 kg
Essai Marshall	Compacité	> 92 à 96 %	> 92 à 96 %
	Fluage	< 2.4	< 2.4
	Résistance à la compression (S _{cm})	> 30	> 35
	Rapport R _c /R _s	> 0.7	> 0.7
Essai Duriez	Compacité	90 à 94 %	90 à 94 %
	Taux d'absorption	< 5 %	< 5 %

Tableau A16.3 : Spécifications sur le mélange des enrobés denses [9]

Classes de trafic	T1	T2	T3	T4	T5
Emploi	oui	oui	oui	oui	oui

Tableau A16.3 : Domaine d'utilisation des enrobés denses.

HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT

Module de rigidité E (10°C et 10 Hz) = 7 200 MPa

Module de rigidité E (30°C et 10 Hz) = 1 300 MPa

Coefficient de Poisson $\nu = 0.35$ $\epsilon = 10^4$ (à 10°C, 25Hz) = 100 $-1/b = 5$

SN = 0.25

S_n = 1 cmk_s = 1.1c = 0.02 cm⁻¹

Module de la couche sous-jacente	Valeurs de k _s
E < 50 MPa	1/1.2
50 ≤ E ≤ 120 MPa	1/1.1
E ≥ 120 MPa	1

Tableau A16.4 : Valeurs de k_s

Trafic	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
NE (millions)	0.87	1.54	4.63	11.59	23.17	49.24	
Risque de calcul (%)	25.0	12.0	5.0	2.0	2.0	2.0	
u	-0.674	-1.175	-1.645	-2.054	-2.054	-2.054	
δ	0.269						
Coefficient de risque k _r	0.920	0.864	0.815	0.775	0.775	0.775	
σ (NE, θ _{eq} , f) . 10 ⁶	241.99	215.87	171.75	144.17	125.52	107.95	
E _{1,eq} . 10 ⁶	k _s = 1/1.2	204.04	171.05	128.39	102.44	89.19	76.71
	k _s = 1/1.1	222.58	186.60	140.06	111.75	97.30	83.68
	k _s = 1	244.84	205.26	154.07	122.93	107.03	92.05

Tableau A16.5 : Contraintes et déformations admissibles pour les enrobés denses

FM 14 : SAND ASPHALT

Classes de trafic	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Utilisation	oui	oui	-	-	-	-

Tableau A17.3 : Domaine d'utilisation des sand-asphalt.

Spécifications	Valeurs
% de fines	$\leq 12 \%$
ES	> 40
C_c	$1 \leq C_c \leq 3$
C_u	$3.5 \leq C_u \leq 20$
Teneur en bitume	6.5 à 7 %
Bitume	80/100 ou 60/70
Module de richesse K	entre 3.5 et 4.2
Épaisseur	3 à 4 cm

Tableau A17.1 : Spécifications sur les granulats pour enrobés denses [9]

Tamis (mm)	0/14
6.3	100
2	75 - 100
1	50 - 96
0.5	25 - 88
0.2	10 - 50
0.08	6 - 14

Tableau A17.2: Fuseaux granulométriques CEBTP pour sand-asphalt [9]

	Spécifications	Valeurs
Essai Hubbard- Field	Stabilité	≥ 700 kg
	Compacité Hubbard-Field	≥ 88 à 96 % avec sable naturel ≥ 88 à 96 % avec incorporat° de sable de concassage
Essai Duniez	Résistance 7 jours à l'air à 18 °C (bars)	> 35
	Rapport R_c / R_c	> 0.7
	Compacité	90 à 94 %

Tableau A17.2 : Spécifications sur le mélange des sand-asphalt [9]

CATALOGUE DES STRUCTURES TYPES DE CHAUSSEES

ANNEXE B : FICHES DE STRUCTURES

		SN / GN			
Structure	S2				
		S2	S3	S4	S5
Classe de plateforme					
CBR	5	10	15	30	60
E (MPa)	25	50	75	150	300
ME (kN/m²)	10E + 0,24 millions				
TC6	NR	NR	NR	NR	NR
ME (kN/m²)	10E + 0,75 millions				
TC5	NR	NR	NR	NR	NR
ME (kN/m²)	10E + 1,33 millions				
TC4	NR	NR	NR	NR	NR
ME (kN/m²)	10E + 4,02 millions				
TC3	NR	NR	NR	NR	NR
ME (kN/m²)	10E + 10,20 millions				
TC2	4 cm	4 cm	4 cm	4 cm	4 cm
	26 cm	26 cm	32 cm	20 cm	
	33 cm	22 cm			
ME (kN/m²)	10E + 0,37 millions				
TC1	3 cm	3 cm	3 cm	3 cm	3 cm
	24 cm	24 cm	27 cm	18 cm	
	28 cm	20 cm			

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

		SN / LAT 2			
Structure S3					
	Classe de plateforme CBR E (MPa)	S2	S3	S4	S5
	5 25	10 50	15 75	30 150	50 300
ME = 12,24 millions					
TC6		NR	NR	NR	NR
ME = 31,76 millions					
TC5		NR	NR	NR	NR
ME = 17,58 millions					
TC4		NR	NR	NR	NR
ME = 8,84 millions					
TC3		NR	NR	NR	NR
ME = 7,31 millions					
TC2					
		4 cm 26 cm 31 cm	4 cm 26 cm 20 cm	4 cm 29 cm 19 cm	4 cm 19 cm 19 cm
ME = 0,87 millions					
TC1					
		3 cm 23 cm 27 cm	3 cm 23 cm 20 cm	3 cm 25 cm 17 cm	3 cm 17 cm 17 cm

NR, non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

SN / LACo

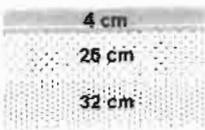
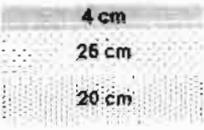
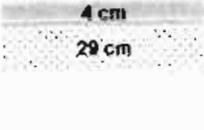
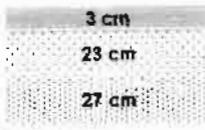
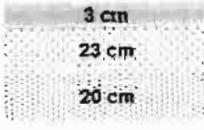
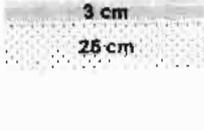
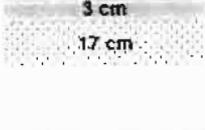
Béton Bitumineux

Graveaux latéritiques améliorés aux concassés

Sable Naturel

Structure	S2		S3		S4		S5	
	CBR	E (MPa)	CBR	E (MPa)	CBR	E (MPa)	CBR	E (MPa)
Classe de plateforme	5	10	15	30	50	90		
NE = 11,24 millions	25	50	75	150	300			
TC6	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
NE = 24,16 millions								
TC5	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
NE = 11,98 millions								
TC4	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
NE = 8,09 millions								
TC3	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
NE = 2,10 millions								
TC2	4 cm 23 cm 32 cm	4 cm 23 cm 20 cm	4 cm 27 cm	4 cm 18 cm				
NE = 0,87 millions								
TC1	3 cm 21 cm 28 cm	3 cm 21 cm 20 cm	3 cm 24 cm	3 cm 16 cm				

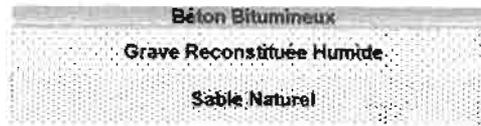
NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

Structure	SN / GNT				
	S2	S3	S4	S5	S6
<p>S5</p> 					
<p>Classe de plateforme</p> <p>CBR</p> <p>E (MPa)</p>	5	10	15	30	60
<p>E (MPa)</p> <p>25</p>	50	75	150	300	
<p>NE = 11,35 millions</p>					
TC6	NR	NR	NR	NR	
<p>NE = 34,10 millions</p>					
TC5	NR	NR	NR	NR	
<p>NE = 11,35 millions</p>					
TC4	NR	NR	NR	NR	
<p>NE = 9,62 millions</p>					
TC3	NR	NR	NR	NR	
<p>NE = 2,20 millions</p>					
TC2					
<p>NE = 0,81 millions</p>					
TC1					

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

SN / GRH

Structure
S6

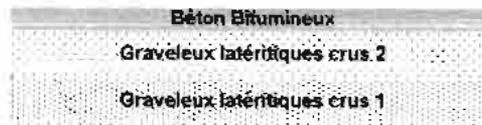


Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5
CBR	5	10	15	30
E (MPa)	25	50	75	150
PE = 71 24 millions				
TC6	NR	NR	NR	NR
PE = 34 74 millions				
TC5	NR	NR	NR	NR
PE = 17 23 millions				
TC4	NR	NR	NR	NR
PE = 9 09 millions				
TC3	NR	NR	NR	NR
PE = 2 50 millions				
TC2	4 cm 23 cm 32 cm	4 cm 23 cm 20 cm	4 cm 27 cm	4 cm 18 cm
PE = 0 81 millions				
TC1	3 cm 21 cm 28 cm	3 cm 21 cm 20 cm	3 cm 24 cm	3 cm 18 cm

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

LAT 1 / LAT 2

Structure
S7



Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5
CBR	5	10	15	30
E (MPa)	25	50	75	150
NE = 17 millions				
TC6	NR	NR	NR	NR
NE = 14 millions				
TC5	NR	NR	NR	NR
NE = 11 millions				
TC4	NR	NR	NR	NR
NE = 8 millions				
TC3	NR	NR	NR	NR
NE = 5 millions				
TC2				
NE = 0.57 millions				
TC1				

*** A metre en œuvre on deux couches

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

LAT 1 / GN						
Structure	Béton Bitumineux				Grave Naturelle	
	Graveux latéritiques crus 1					
Structure	S2	S3	S4	S5		
Classe de plateforme						
CBR	5	10	15	30	50	
E (MPa)	25	50	75	150	300	
12 - 17,25 millions						
TC6	NR	NR	NR	NR		
15 - 21,75 millions						
TC5	NR	NR	NR	NR		
18 - 27 millions						
TC4	NR	NR	NR	NR		
24 - 36 millions						
TC3	NR	NR	NR	NR		
36 - 54 millions						
TC2	4 cm	4 cm	4 cm	4 cm		
	26 cm	26 cm	32 cm	20 cm		
	33 cm	22 cm				
54 - 81 millions						
TC1	3 cm	3 cm	3 cm	3 cm		
	24 cm	24 cm	27 cm	18 cm		
	28 cm	20 cm				

*** A mettre en œuvre en deux couches

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

LAT 1 / GNT					
Structure	Béton Bitumineux				S5
	Grave Non Traitée				
Classe de plateforme	S2	S3	S4		
	CBR 5	10	15	30	60
E (MPa)	25	50	75	150	300
TC6	NR	NR	NR	NR	
TC5	NR	NR	NR	NR	
TC4	NR	NR	NR	NR	
TC3	NR	NR	NR	NR	
TC2	4 cm	4 cm	4 cm	4 cm	
	25 cm	25 cm	29 cm	19 cm	
TC1	3 cm	3 cm	3 cm	3 cm	
	23 cm	23 cm	25 cm	17 cm	

NR: non recommandés (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

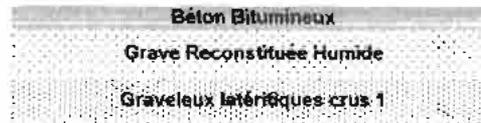
LAT1 / LACo					
Structure	Béton Bitumineux				S5
	Graveleux latéritiques améliorés aux concasses		Graveleux latéritiques crus ¹		
Classe de plateforme	S7	S3	S4		
CBR	5	10	15	30	60
E (MPa)	25	50	75	150	300
TE = 17 millions					
TC6	NR	NR	NR	NR	
TE = 54 millions					
TC5	NR	NR	NR	NR	
TE = 112 millions					
TC4	NR	NR	NR	NR	
TE = 535 millions					
TC3	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	
	28 cm	28 cm	28 cm	28 cm	24 cm
	39 cm ^{***}	28 cm	15 cm		
TE = 90 millions					
TC2	4 cm	4 cm	4 cm	4 cm	
	23 cm	23 cm	27 cm	18 cm	
	32 cm	20 cm			
TE = 137 millions					
TC1	3 cm	3 cm	3 cm	3 cm	
	21 cm	21 cm	24 cm	16 cm	
	28 cm	20 cm			

*** A mettre en œuvre en deux couches

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

LAT 1 / GRH

Structure
S11



Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5
CBR	5	10	15	30
E (MPa)	25	50	75	150

NE = 77,54 millions

TC6	NR	NR	NR	NR
-----	----	----	----	----

NE = 31,35 millions

TC5	NR	NR	NR	NR
-----	----	----	----	----

NE = 11,37 millions

TC4	NR	NR	NR	NR
-----	----	----	----	----

NE = 4,68 millions



NE = 2,90 millions



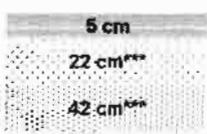
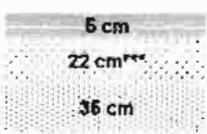
NE = 1,31 millions



*** A mettre en œuvre en deux couches

NR, non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

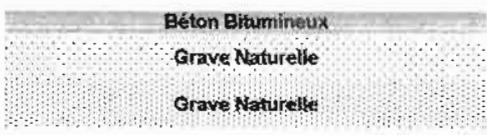
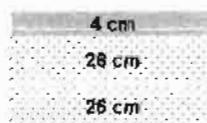
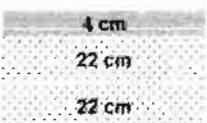
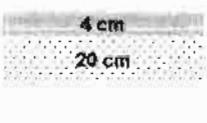
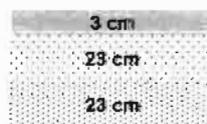
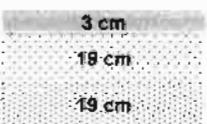
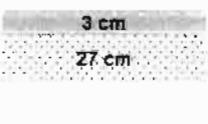
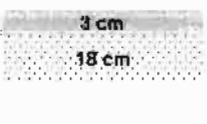
LAT 2 ou GNT / GB

Structure	Béton Bitumineux Grave-Bitume Graveleux latéritiques crus 2 ou GNT			
	S2	S3	S4	S5
Classe de plateforme CBR	5	10	15	30
E (MPa)	25	50	75	150
NE = 11,24 millions				
TC6	NR	NR	NR	NR
NE = 34,76 millions				
TC5	NR	NR	NR	NR
NE = 11,25 millions				
TC4	NR	NR	NR	NR
NE = 3,55 millions				
TC3				
NE = 2,90 millions				
TC2	NE	NE	NE	NE
NE = 4,46 millions				
TC1	NE	NE	NE	NE

*** A mettre en œuvre en deux couches

NE: non économique (des matériaux moins nobles devraient convenir)

GN / GN

Structure	GN / GN			
	S2	S3	S4	S5
S13 				
Classe de plateforme CBR E (MPa) <small>NE = 21,34 millions</small>	5 25	10 50	15 75	30 150 60 300
TC6	NR	NR	NR	NR
<small>NE = 21,15 millions</small>				
TC5	NR	NR	NR	NR
<small>NE = 17,35 millions</small>				
TC4	NR	NR	NR	NR
<small>NE = 8,85 millions</small>				
TC3	NR	NR	NR	NR
<small>NE = 7,90 millions</small>				
TC2				
<small>NE = 6,07 millions</small>				
TC1				

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

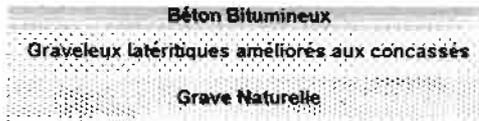
		GN / LAT 2				
		Béton Bitumineux Graveleux latéritiques crus 2 Grève Naturelle				
Structure	Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5	
S14	CBR	5	10	15	30	60
	E (MPa)	25	50	75	150	300
NE = 77,24 millions						
TC6		NR	NR	NR	NR	
NE = 34,25 millions						
TC5		NR	NR	NR	NR	
NE = 17,26 millions						
TC4		NR	NR	NR	NR	
NE = 8,63 millions						
TC3		NR	NR	NR	NR	
NE = 5,90 millions						
TC2		4 cm 15 cm 35 cm	4 cm 15 cm 27 cm	4 cm 15 cm 16 cm	4 cm 19 cm	
	NE = 3,27 millions					
TC1		3 cm 18 cm 29 cm	3 cm 18 cm 21 cm	3 cm 25 cm	3 cm 17 cm	

*** A mettre en œuvre en deux couches

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

GN / LACo

Structure
S15



Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5
CBR	5	10	15	30
E (MPa)	25	50	75	150
NE (millions)				

TC6	NR	NR	NR	NR
NE (millions)				

TC5	NR	NR	NR	NR
NE (millions)				

TC4	NR	NR	NR	NR
NE (millions)				

TC3				
NE (millions)				

TC2				
NE (millions)				

TC1				
NE (millions)				

*** A mettre en œuvre en deux couches

NR, non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

		GN / GNT				
Structure S16						
Classe de plateforme		S2	S3	S4	S5	
GBR		5	10	15	30	60
E (MPa)		25	50	75	150	300
NE = 11 24 millions						
TC6		NR	NR	NR	NR	
NE = 31 76 millions						
TC5		NR	NR	NR	NR	
NE = 12 38 millions						
TC4		NR	NR	NR	NR	
NE = 8 02 millions						
TC3		NR	NR	NR	NR	
NE = 2 00 millions						
TC2						
NE = 0 87 millions						
TC1						

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

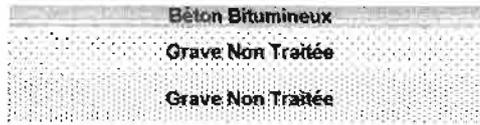
		GN / GRH			
Structure S17					
	Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5
CBR	5	10	15	30	50
E (MPa)	25	50	75	150	300
NE = 17,24 millions					
TC6	NR	NR	NR	NR	
NE = 31,70 millions					
TC5	NR	NR	NR	NR	
NE = 17,29 millions					
TC4	NR	NR	NR	NR	
NE = 8,50 millions					
TC3					
	NE = 2,50 millions				
TC2					
	NE = 0,87 millions				
TC1					

*** A mettre en œuvre en deux couches

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

GNT / GNT

Structure
S19



Classe de plateforme	S2		S3		S4		S5	
CBR	5	10	15	30	60	90	150	300
E (MPa)	25	50	75	150	300	450	900	1800

NE = 75 millions

TC6	NR	NR	NR	NR
-----	----	----	----	----

NE = 2176 millions

TC5	NR	NR	NR	NR
-----	----	----	----	----

NE = 1732 millions

TC4	NR	NR	NR	NR
-----	----	----	----	----

NE = 829 millions

TC3	NR	NR	NR	NR
-----	----	----	----	----

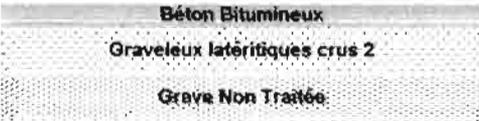
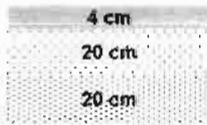
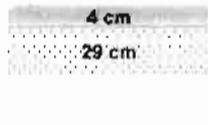
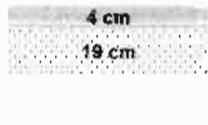
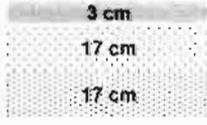
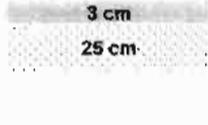
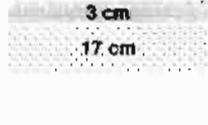
NE = 210 millions

TC2	4 cm	4 cm	4 cm	4 cm
	24 cm	20 cm	29 cm	19 cm
	24 cm	20 cm		

NE = 87 millions

TC1	3 cm	3 cm	3 cm	3 cm
	21 cm	17 cm	25 cm	17 cm
	21 cm	17 cm		

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

GNT / LAT2					
Structure					
Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5	
CBR	5	10	15	30	50
E (MPa)	25	50	75	150	300
TC	1124 millions				
TC6	NR	NR	NR	NR	
TC	3070 millions				
TC5	NR	NR	NR	NR	
TC	1124 millions				
TC4	NR	NR	NR	NR	
TC	300 millions				
TC3	NR	NR	NR	NR	
TC	230 millions				
TC2					
TC	0,97 millions				
TC1					

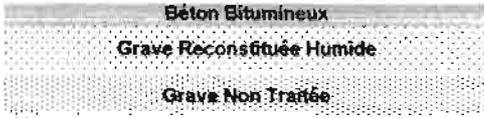
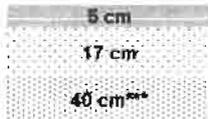
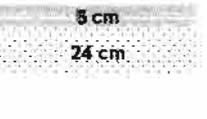
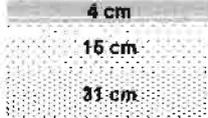
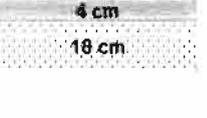
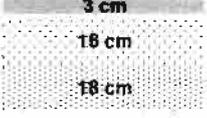
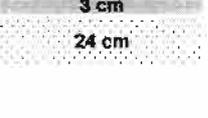
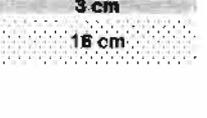
*** A mettre en œuvre en deux couches

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

		GNT / LACo			
		Béton Bitumineux Graveleux lateritiques améliorés aux concassés Grève Non Traitée			
Structure		S2	S3	S4	S5
Structure S21	Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5
	CBR	5	10	15	30
	E (MPa)	25	50	75	150
NE = 17,14 millions					
TC6		NR	NR	NR	NR
NE = 50,73 millions					
TC5		NR	NR	NR	NR
NE = 17,36 millions					
TC4		NR	NR	NR	NR
NE = 8,69 millions					
TC3		5 cm 26 cm 31 cm	5 cm 20 cm 28 cm	5 cm 17 cm 21 cm	5 cm 24 cm
	NE = 2,91 millions				
TC2		4 cm 20 cm 25 cm	4 cm 15 cm 23 cm	4 cm 15 cm 15 cm	4 cm 18 cm
	NE = 1,917 millions				
TC1		3 cm 18 cm 25 cm	3 cm 15 cm 18 cm	3 cm 24 cm	3 cm 16 cm

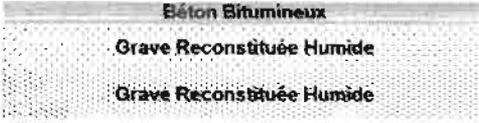
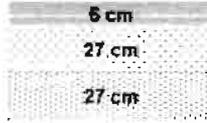
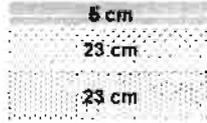
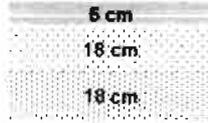
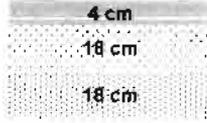
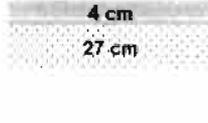
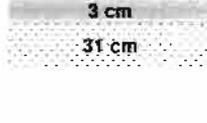
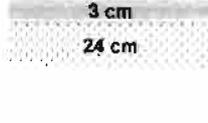
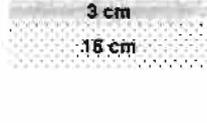
*** A mettre en œuvre en deux couches

NR: non recommandée (les sollicitations devraient être très importantes pour le matériau)

		GNT / GRH				
Structure S22						
Classe de plateforme		S2	S3	S4	S5	
CBR		5	10	15	30	60
E (MPa)		25	50	75	150	300
NE = 17,24 millions						
TC6		NR	NR	NR	NR	
NE = 14,13 millions						
TC5		NR	NR	NR	NR	
NE = 11,03 millions						
TC4		NR	NR	NR	NR	
NE = 8,93 millions						
TC3						
NE = 2,00 millions						
TC2						
NE = 0,91 millions						
TC1						

*** A mettre en œuvre en deux couches

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

		GRH / GRH			
Structure	S23				
Classe de plateforme	S1	S3	S4	S5	
CBR	5	10	15	30	50
E (MPa)	25	50	75	150	300
NE = 27,25 millions					
TC6	NR	NR	NR	NR	
NE = 31,75 millions					
TC5	NR	NR	NR	NR	
NE = 37,38 millions					
TC4	NR	NR	NR	NR	
NE = 43,59 millions					
TC3					
NE = 51 millions					
TC2					
NE = 63,87 millions					
TC1					

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériel)

GRH / LACo

Structure	Béton Bitumineux			
	Graveleux lateritiques améliorés aux concassés			
Grave Reconstituée Humide				
Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5
CBR	5	10	15	30
E (MPa)	25	50	75	150
ME (milliers)	10	10	10	10
TC6	NR	NR	NR	NR
ME = 14,14 millions				
TC5	NR	NR	NR	NR
ME = 17,36 millions				
TC4	NR	NR	NR	NR
ME = 6,60 millions				
TC3	5 cm 27 cm 27 cm	5 cm 23 cm 23 cm	5 cm 18 cm 18 cm	5 cm 24 cm
ME = 2,36 millions				
TC2	4 cm 22 cm 22 cm	4 cm 18 cm 18 cm	4 cm 27 cm	4 cm 18 cm
ME = 0,97 millions				
TC1	3 cm 19 cm 19 cm	3 cm 21 cm	3 cm 24 cm	3 cm 18 cm

*** A mettre en œuvre en deux couches

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

LACo / LACo						
Structure	Béton Bitumineux					
	Graveleux latéritiques améliorés aux concassés				Graveleux latéritiques améliorés aux concassés	
Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5		
CBR	5	10	15	30	60	
E (MPa)	25	50	75	150	300	
NE = 71,24 millions						
TC6	NR	NR	NR	NR		
NE = 34,70 millions						
TC5	NR	NR	NR	NR		
NE = 11,20 millions						
TC4	NR	NR	NR	NR		
NE = 8,60 millions						
TC3	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm		
	27 cm	23 cm	18 cm	24 cm		
	27 cm	23 cm	18 cm			
NE = 1,90 millions						
TC2	4 cm	4 cm	4 cm	4 cm		
	22 cm	18 cm	27 cm	18 cm		
	22 cm	18 cm				
NE = 0,67 millions						
TC1	3 cm	3 cm	3 cm	3 cm		
	19 cm	31 cm	24 cm	18 cm		
	19 cm					

NR: non recommandée (les sollicitations deviennent très importantes pour le matériau)

NE: non économique (des matériaux moins nobles devraient convenir)

LACo / GB					
Structure	Béton Bitumineux				S5
	Grave-bitume				
S26	Graveaux latéritiques améliorés aux concassés				
Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5	
CBR	5	10	15	30	60
E (MPa)	25	50	75	150	300
NE = 21 24 millions					
TC6	NR	NR	NR	NR	
NE = 24 26 millions					
TC5	NR	NR	NR	NR	
NE = 17 25 millions					
TC4	6 cm 24 cm*** 44 cm***	6 cm 24 cm*** 39 cm***	6 cm 24 cm*** 32 cm	6 cm 23 cm*** 25 cm	
	NE = 8 08 millions				
TC3	5 cm 20 cm*** 34 cm	5 cm 20 cm*** 30 cm	5 cm 18 cm*** 35 cm	5 cm 18 cm*** 22 cm	
	NE = 2 30 millions				
TC2	NE	NE	NE	NE	
NE = 0 07 millions					
TC1	NE	NE	NE	NE	

NE: non économique (des matériaux moins nobles devraient convenir)

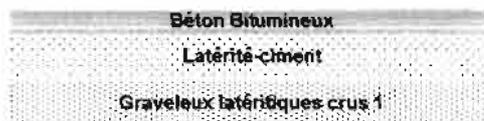
Remarque : Ce type de structure est à proscrire puisqu'étant très peu économique

		LAC / LAC				
Structure	H2	Béton Bitumineux Latérite-ciment Latérite-ciment				
		S2	S3	S4	S5	
Classe de plateforme		5	10	15	30	60
CBR		25	50	75	150	300
E (MPa)		25	50	75	150	300
NE = 112,52 millions						
TC6		8 cm 27 cm 27 cm	8 cm 24 cm 24 cm	8 cm 21 cm 21 cm	8 cm 29 cm	
NE = 51,25 millions						
TC5		7 cm 24 cm 24 cm	7 cm 21 cm 21 cm	7 cm 36 cm	7 cm 24 cm	
NE = 28,34 millions						
TC4		6 cm 22 cm 22 cm	6 cm 19 cm 19 cm	6 cm 31 cm	6 cm 22 cm	
NE = 14,17 millions						
TC3		5 cm 20 cm 20 cm	5 cm 34 cm	5 cm 26 cm	5 cm 19 cm	
NE = 4,71 millions						
TC2		NE	NE	NE	NE	
NE = 1,41 millions						
TC1		NE	NE	NE	NE	

NE: non économique (des matériaux moins nobles devraient convenir)

LAT1 / LAC

Structure
H4



Classe de plateforme	S2	S3	S4	S5
CBR	5	10	15	30
E (MPa)	25	50	75	150

NE = 100,32 millions

TC6	NR	NR	NR	NR
-----	----	----	----	----

NE = 56,48 millions

TC5	7 cm 28 cm*** 46 cm***	7 cm 28 cm*** 30 cm	7 cm 28 cm*** 15 cm	7 cm 24 cm
-----	------------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------

NE = 26,24 millions

TC4	6 cm 26 cm 46 cm***	6 cm 28 cm 32 cm	6 cm 26 cm 16 cm	6 cm 22 cm
-----	---------------------------	------------------------	------------------------	---------------

NE = 14,17 millions

TC3	5 cm 22 cm 42 cm***	5 cm 22 cm 30 cm	5 cm 22 cm 16 cm	5 cm 19 cm
-----	---------------------------	------------------------	------------------------	---------------

NE = 4,71 millions

TC2	NE	NE	NE	NE
-----	----	----	----	----

NE = 1,41 millions

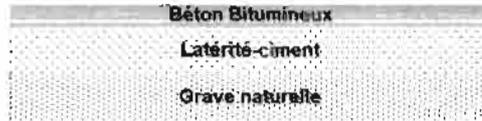
TC1	NE	NE	NE	NE
-----	----	----	----	----

*** A mettre en œuvre en deux couches

NE : non économique (des matériaux moins nobles devraient convenir)

GN / LAC

Structure
H5

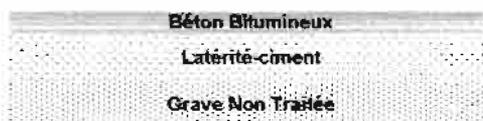


Classe de plateforme	S2		S3		S4		S5	
	5	10	15	30	60	900		
E (MPa)	25	50	75	150	300			
NE = 1200 millions								
TC6	8 cm 25 cm 60 cm***	8 cm 25 cm 39 cm***	8 cm 22 cm 29 cm	8 cm 22 cm 16 cm				
NE = 550 millions								
TC5	7 cm 23 cm 45 cm***	7 cm 23 cm 35 cm	7 cm 20 cm 25 cm	7 cm 19 cm 20 cm				
NE = 280 millions								
TC4	6 cm 20 cm 43 cm***	6 cm 20 cm 33 cm	6 cm 18 cm 23 cm	6 cm 22 cm				
NE = 140 millions								
TC3	5 cm 16 cm 42 cm***	5 cm 16 cm 33 cm	5 cm 16 cm 20 cm	5 cm 19 cm				
NE = 70 millions								
TC2	NE	NE	NE	NE				
NE = 14 millions								
TC1	NE	NE	NE	NE				

NE: non économique (des matériaux moins nobles devraient convenir)

GNT / LAC

Structure
H6

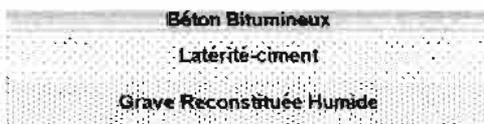


Classe de plateforme CBR E (MPa)	S2		S3		S4		S5																							
	5	10	15	30	50	60	300																							
1E = 1052 millions	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">TC6</td> <td>8 cm</td> </tr> <tr> <td>25 cm</td> <td>25 cm</td> <td>20 cm</td> <td>20 cm</td> <td>20 cm</td> <td>20 cm</td> <td>20 cm</td> </tr> <tr> <td>44 cm***</td> <td>35 cm</td> <td>30 cm</td> <td>30 cm</td> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> </tr> </table>								TC6	8 cm	25 cm	25 cm	20 cm	44 cm***	35 cm	30 cm	30 cm	15 cm	15 cm	15 cm										
TC6	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm																							
	25 cm	25 cm	20 cm																											
	44 cm***	35 cm	30 cm	30 cm	15 cm	15 cm	15 cm																							
1E = 654 millions	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">TC5</td> <td>7 cm</td> </tr> <tr> <td>20 cm</td> <td>20 cm</td> <td>16 cm</td> <td>16 cm</td> <td>16 cm</td> <td>16 cm</td> <td>16 cm</td> </tr> <tr> <td>44 cm***</td> <td>35 cm</td> <td>29 cm</td> <td>29 cm</td> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> </tr> </table>								TC5	7 cm	20 cm	20 cm	16 cm	44 cm***	35 cm	29 cm	29 cm	15 cm	15 cm	15 cm										
TC5	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm																							
	20 cm	20 cm	16 cm																											
	44 cm***	35 cm	29 cm	29 cm	15 cm	15 cm	15 cm																							
1E = 28 (2 millions)	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">TC4</td> <td>6 cm</td> <td>6 cm</td> <td>6 cm</td> <td>6 cm</td> <td>6 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> </tr> <tr> <td>16 cm</td> <td>16 cm</td> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> <td>22 cm</td> <td>22 cm</td> </tr> <tr> <td>44 cm***</td> <td>35 cm</td> <td>26 cm</td> <td>26 cm</td> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> </tr> </table>								TC4	6 cm	8 cm	8 cm	16 cm	16 cm	15 cm	15 cm	15 cm	22 cm	22 cm	44 cm***	35 cm	26 cm	26 cm	15 cm	15 cm	15 cm				
TC4	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	8 cm	8 cm																							
	16 cm	16 cm	15 cm	15 cm	15 cm	22 cm	22 cm																							
	44 cm***	35 cm	26 cm	26 cm	15 cm	15 cm	15 cm																							
1E = 14 (1 millions)	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">TC3</td> <td>6 cm</td> <td>6 cm</td> <td>6 cm</td> <td>6 cm</td> <td>6 cm</td> <td>5 cm</td> <td>5 cm</td> </tr> <tr> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> <td>19 cm</td> <td>19 cm</td> </tr> <tr> <td>38 cm***</td> <td>30 cm</td> <td>18 cm</td> <td>18 cm</td> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> <td>15 cm</td> </tr> </table>								TC3	6 cm	5 cm	5 cm	15 cm	19 cm	19 cm	38 cm***	30 cm	18 cm	18 cm	15 cm	15 cm	15 cm								
TC3	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	5 cm	5 cm																							
	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm	19 cm	19 cm																							
	38 cm***	30 cm	18 cm	18 cm	15 cm	15 cm	15 cm																							
1E = 4 (1 millions)	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">TC2</td> <td>NE</td> <td>NL</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> </tr> <tr> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> </tr> <tr> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> </tr> </table>								TC2	NE	NL	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
TC2	NE	NL	NE	NE	NE	NE	NE																							
	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE																							
	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE																							
1E = 1 (41 millions)	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">TC1</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> </tr> <tr> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> </tr> <tr> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> </tr> </table>								TC1	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE							
TC1	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE																							
	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE																							
	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE																							

NE, non économique (des matériaux moins nobles devraient convenir)

GRH / LAC

Structure
H7



Classe de plateforme CBR	S2		S3		S4		S3	
	5	10	15	30	50	75	150	300
E (MPa)	25	50	75	150	150	150	150	300
TE = 125,02 millions								
TC6	8 cm 23 cm 44 cm ^{NE}	8 cm 23 cm 35 cm	8 cm 17 cm 32 cm	8 cm 17 cm 17 cm				
TE = 98,15 millions								
TC5	7 cm 18 cm 43 cm ^{NE}	7 cm 18 cm 35 cm	7 cm 15 cm 28 cm	7 cm 16 cm 15 cm				
TE = 78,24 millions								
TC4	6 cm 15 cm 41 cm ^{NE}	6 cm 15 cm 33 cm	6 cm 15 cm 23 cm	6 cm 22 cm				
TE = 54,12 millions								
TC3	5 cm 16 cm 34 cm	5 cm 15 cm 27 cm	5 cm 16 cm 17 cm	5 cm 19 cm				
TE = 4,71 millions								
TC2	NE	NE	NE	NE				
TE = 1,41 millions								
TC1	NE	NE	NE	NE				

NE: non économique (des matériaux moins nobles devraient convenir)

LACo / LAC

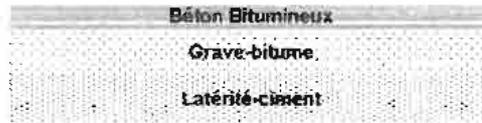
Structure	Béton Bitumineux				Latérite-ciment			
	Graveleux latéritiques améliorés aux concassés							
Classé de plateforme	S2		S3		S4		S5	
	5	10	15	30	60	100	150	300
CBR								
E (MPa)	25		50		75		150	
NE = 120,52 millions								
TC6	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm
	23 cm	23 cm	23 cm	17 cm	17 cm	17 cm	17 cm	17 cm
	44 cm***	36 cm	32 cm	32 cm	32 cm	32 cm	32 cm	32 cm
NE = 59,48 millions								
TC5	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm
	18 cm	18 cm	18 cm	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm
	43 cm***	36 cm	28 cm	28 cm	28 cm	28 cm	28 cm	28 cm
NE = 35,24 millions								
TC4	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm
	16 cm	16 cm	16 cm	16 cm	16 cm	16 cm	16 cm	22 cm
	41 cm***	33 cm	23 cm	23 cm	23 cm	23 cm	23 cm	23 cm
NE = 14,12 millions								
TC3	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm
	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm	19 cm
	34 cm	27 cm	17 cm	17 cm	17 cm	17 cm	17 cm	17 cm
NE = 4,71 millions								
TC2	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
NE = 1,41 millions								
TC1	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE

*** A mettre en œuvre en deux couches

NE: non économique (des matériaux moins nobles devraient convenir)

LAC / GB

Structure
M2



Classe de plateforme CBR E (MPa)	S2		S3		S4		S5																										
	5	10	15	30	60	90	150	300																									
NE = 11,82 millions	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">TC6</td> <td>8 cm</td> </tr> <tr> <td>16 cm</td> <td>13 cm</td> <td>10 cm</td> <td>10 cm</td> <td>10 cm</td> <td>10 cm</td> <td>10 cm</td> <td>10 cm</td> </tr> <tr> <td>36 cm</td> <td>32 cm</td> <td>28 cm</td> <td>28 cm</td> <td>28 cm</td> <td>28 cm</td> <td>28 cm</td> <td>28 cm</td> </tr> </table>								TC6	8 cm	16 cm	13 cm	10 cm	36 cm	32 cm	28 cm																	
TC6	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm																									
	16 cm	13 cm	10 cm																														
	36 cm	32 cm	28 cm																														
NE = 12,14 millions	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">TC5</td> <td>7 cm</td> </tr> <tr> <td>15 cm</td> <td>12 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> </tr> <tr> <td>30 cm</td> <td>28 cm</td> <td>25 cm</td> <td>25 cm</td> <td>25 cm</td> <td>25 cm</td> <td>25 cm</td> <td>19 cm</td> </tr> </table>								TC5	7 cm	15 cm	12 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	30 cm	28 cm	25 cm	19 cm											
TC5	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm																									
	15 cm	12 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm																									
	30 cm	28 cm	25 cm	19 cm																													
NE = 8,17 millions	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">TC4</td> <td>6 cm</td> </tr> <tr> <td>14 cm</td> <td>11 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> </tr> <tr> <td>27 cm</td> <td>25 cm</td> <td>21 cm</td> <td>21 cm</td> <td>21 cm</td> <td>21 cm</td> <td>21 cm</td> <td>15 cm</td> </tr> </table>								TC4	6 cm	14 cm	11 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	27 cm	25 cm	21 cm	15 cm											
TC4	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm																									
	14 cm	11 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm																									
	27 cm	25 cm	21 cm	15 cm																													
NE = 11,03 millions	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">TC3</td> <td>5 cm</td> </tr> <tr> <td>13 cm</td> <td>10 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> <td>8 cm</td> </tr> <tr> <td>25 cm</td> <td>22 cm</td> <td>17 cm</td> <td>17 cm</td> <td>17 cm</td> <td>17 cm</td> <td>17 cm</td> <td>16 cm</td> </tr> </table>								TC3	5 cm	13 cm	10 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	25 cm	22 cm	17 cm	16 cm											
TC3	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm																									
	13 cm	10 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm																									
	25 cm	22 cm	17 cm	16 cm																													
NE = 4,24 millions	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">TC2</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>								TC2	NE																							
TC2	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE																									
NE = 1,32 millions	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">TC1</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>								TC1	NE																							
TC1	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE																									

NE: non économique (des matériaux moins nobles devraient convenir)